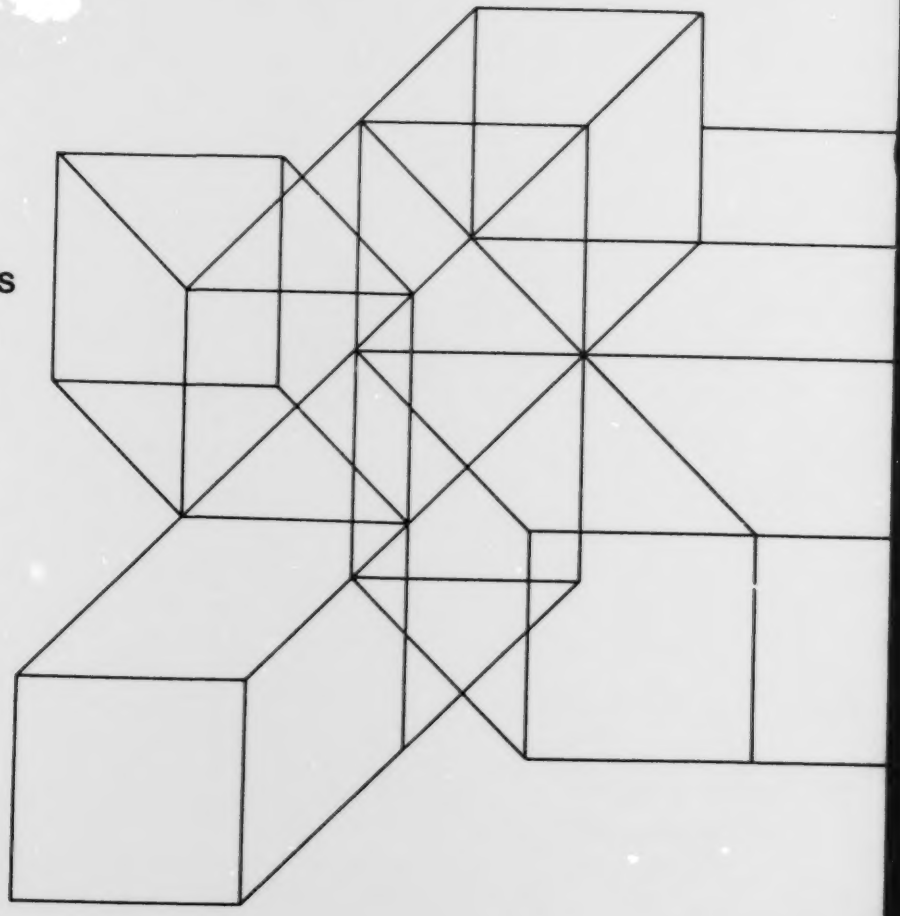
Science Council of Canada
Conseil des sciences du Canada

Epistemology and The Teaching of Science

A Discussion Paper
by Robert Nadeau
and Jacques Désautels



Discussion Paper D84/2

85-3272/

EPISTEMOLOGY
AND THE
TEACHING OF SCIENCE

A Discussion Paper
by Robert Nadeau
and Jacques Désautels

April 1984

Discussion Papers are working documents. They are made available by the Science Council of Canada, in limited numbers, to interested groups and individuals for the benefit of their comments.

The views expressed in this Discussion Paper are those of the author and are not necessarily endorsed by the Science Council of Canada.

Copies of

EPISTEMOLOGY AND THE TEACHING OF SCIENCE

are available
free of charge from:

The Publications Office
Science Council of Canada
100 Metcalfe Street
Ottawa, Ontario.
K1P 5M1

Des exemplaires de
Epistémologie et didactique des sciences
sont disponibles gratuitement

© Minister of Supply and Services, 1984

Catalogue No. SS21-5/1984-6E
ISBN No. 0-662-13214-9

CONTENTS

Foreword 5

I. INTRODUCTION 7

II. PERSPECTIVE: THE PLACE OF THE SCHOOL IN THE SCIENCE SYSTEM 9

The Kuhn Development 9
The Myth of Scientism 12
The Epistemological Factor 14

III. NAIVE REALISM 17

That Scientific Knowledge Is the Reflection of Things as They Actually Are 17
Pedagogic Neutralization 18
Activity 1: The Map and the Topographical Area 20
Activity 2: The Voyage of Christopher Columbus 21

IV. BLISSFUL EMPIRICISM 23

That All Scientific Knowledge Derives Directly and Exclusively from Observation of Phenomena 23
Pedagogic Attenuation 24
Activity 3: I Listen, I Smell, I Touch - and I Look with my Ideas! 26

V. CREDULOUS EXPERIMENTALISM 29

That Experimentation Makes Possible Conclusive Verification of Hypotheses 29
Pedagogic Elimination 31
Activity 4: A New Type of "Black Box" 33

VI. BLIND IDEALISM 38

That the Scientist Is a Completely Disinterested, Objective Being 38
Pedagogic Denunciation 40
Activity 5: Watson and Crick 44
Activity 6: Darwin & Co. 45

VII. EXCESSIVE RATIONALISM 48

That Science Brings us Gradually Nearer the Truth 48
Pedagogic Eradication 50
Activity 7: Developing a Model 51
Activity 8: Becoming Aware of Progress 51

VIII. THE EPISTEMOLOGICAL REVITALIZATION OF SCIENCE TEACHING 53

The Thought-Provoking Question 53
Scientific Thinking in the School 55

Notes 57

Bibliographical References 59

Publications of the Science and Education Committee 60

FOREWORD

This paper is the seventh in a series of discussion papers prepared for a study of Canadian science education undertaken by the Science Council of Canada. The study, which began in the spring of 1980, had three aims:

- to establish a documented basis for describing the present purposes and general characteristics of science teaching in Canadian schools;
- to conduct a historical analysis of science education in Canada;
- to stimulate active deliberation concerning future options for science education.

In pursuing the third aim, the Science Council has solicited a variety of opinions on science education. These viewpoints, expressed in the form of discussion papers and disseminated as widely as possible, are intended to prompt science educators and others to review current policies and practices.

The first five papers in the series each select a particular characteristic of the "educated person," then argue that science education in schools should emphasize a specific group of aims consistent with this characteristic. By pointing out deficiencies based on these analyses, the authors have criticized current ideas and practices in science education. A sixth asks how all of these criticisms can be responded to in the context of a real science program. James E. Page focused on the lack of a Canadian context for science education; Glen Aikenhead on the need to deal with the social implications of science; Donald A. George on the lack of attention paid to engineering skills; Hugh Munby on the tendency for students to become intellectually dependent on teachers and textbooks; and Marcel Risi on the inadequacy of teaching science

as only a body of knowledge. In the sixth paper, Douglas A. Roberts reconstructs the concept of scientific literacy to represent a balance among a variety of otherwise competing purposes for teaching and learning science.

Robert Nadeau and Jacques Désautels complete the analyses of the previous six papers by identifying preconceptions that are commonly held to be truths by those teaching and learning science in Canadian schools and that contribute to the maintenance of a false image of scientific activity. The authors try to clarify the nature of these preconceptions in order to stimulate discussion and reflection on the thinking processes involved in science education.

It must be stressed that the views expressed in this discussion paper are those of the authors, and not necessarily those of the Science Council or of its Science and Education Committee. However, in publishing this paper, the Council believes that a well-argued position has been set out, and that discussion among a wider audience can benefit Canadian science education in general.

James M. Gilmour
Director of Research
Science Council of Canada

I. INTRODUCTION

The very title of this document may deter many teachers whose concerns as a general rule, and with some justification, are more down to earth: How can I teach the concepts of force, chemical equilibrium or homeostasis to the students I will be meeting tomorrow in my class? How can I make problems in physics, chemistry or biology interesting to them? What method will enable them to get the most out of laboratory sessions? For those involved in the day-to-day teaching of the sciences, these are very relevant questions. To deny their importance would be both unrealistic and indicative of a lack of sensitivity toward those who day after day face the extremely delicate task of educating the young people who will be the leaders of our society in the year 2000.

It is precisely because the education of these young people is so important that we are proposing to teachers some reflections that go beyond everyday considerations. These reflections, although they leave aside for the moment the more routine problems and attempt to focus on some frequently unnoticed aspects of science teaching, are intended primarily to prompt questions and to be a source of renewal. It is often difficult to see the wood for the trees or, in other words, for those in the thick of the action to step back in order to perceive its direction. We are therefore suggesting some avenues of thought in the full realization that only teachers are in a position to initiate and carry through a renewal of scientific education.

Numerous studies in recent years have shown that science teaching has not achieved the objectives set for it some 20 years ago when, under American

influence, the most extensive renewal ever undertaken in science education was begun. It is almost universally agreed that this endeavour was a failure. But if students have not assimilated the experimental method, the scientific attitude or the integrating concepts of science, what have they learned?

Our hypothesis is as follows:

> By giving insufficient thought and attention to the nature of scientific knowledge and the conditions under which it has been developed, science teaching reinforces beliefs and myths that are inherent in scientistic ideology.

The title of this essay, which we have ourselves qualified as a deterrent, begins in this light to make sense. It is our contention that the individual who has not studied the conditions that engender scientific learning (epistemology) cannot acquire a scientific education in the true sense of the term and will be led to accept the beliefs and myths associated with this type of learning (scientism). Pierre Thuillier has defined scientistic ideology as "a virtually blind faith in the cognitive and moral value of science." The first question we will deal with is that of the nature of the beliefs inherent in this ideology. We must also ask how we can interest high school students in the epistemological aspects of science and encourage them to examine their own thinking.

We offer only partial answers to both these questions. This essay is not intended as a course in science epistemology and it can therefore touch upon only a few aspects of this vast area of knowledge. We cannot describe all the the dimensions of scientistic ideology, and the teaching suggestions we provide are merely hypotheses to be explored. The important thing is to stimulate discussion on the basis of a particular point of view on science teaching. Our project thus falls within a crucial area of the Science Council of Canada study on the teaching of science. It is not enough merely to know the state of such teaching, we must examine the question of its future direction.

II. PERSPECTIVE: THE PLACE OF THE SCHOOL IN THE SCIENCE SYSTEM

The Kuhn Development

In 1962, a book was published in the United States that was to change drastically the traditional philosophy of science. Adopting a primarily historical approach to scientific activity, Thomas S. Kuhn, in The Structure of Scientific Revolutions, substituted for the logical and methodological analysis to which epistemologists had until then confined themselves, a much more sociologically oriented approach. Instead of suggesting a normative system of conventions and rules to distinguish authentic science from pseudo-scientific enterprises, Kuhn drew attention to the actual operation of scientific communities. He described scientific activity, at least in the case of the more advanced sciences such as physics, chemistry and biology (though not the social sciences, the humanities or philosophy itself), as a process that followed a specific developmental pattern. The first step is the acquisition of an initial paradigm, that is, the recognition by a group of a particular scientific achievement that opens new avenues of research and in so doing imposes a complete set of methodological as well as metaphysical and moral values. According to Kuhn, the establishment of research traditions gives rise at first to a practice of "normal science" based on the resolution of clearly defined problems, but leads inevitably, because of insurmountable anomalies within the dominant tradition, to a crisis resulting in the establishment of a new paradigm. The schema of his scientific revolution is shown in Figure 1.

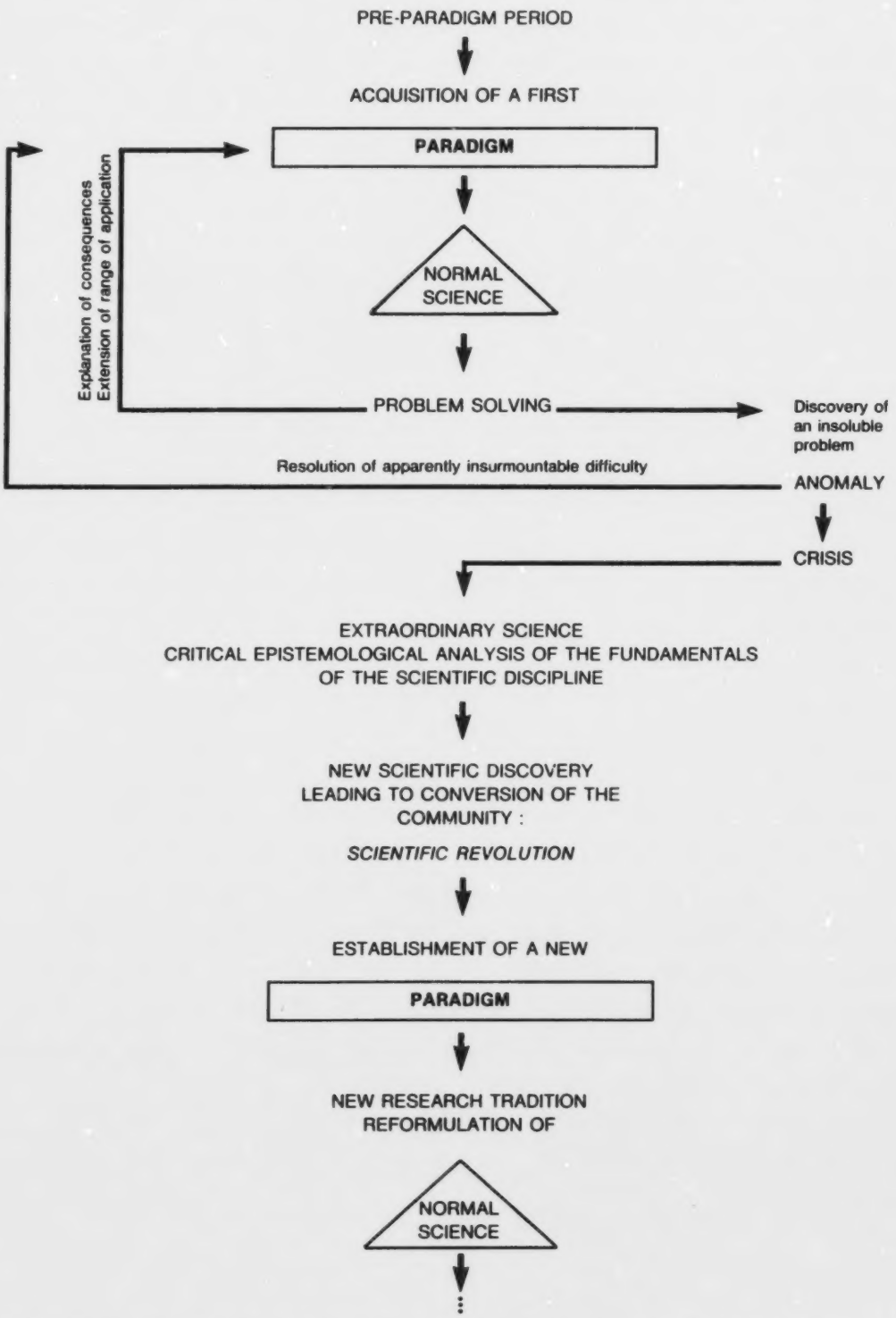


Figure 1: Physical Sciences Development Schema According to T.S. Kuhn

Kuhn took for granted, as have all science philosophers since Kant, that science was from the outset a spectacular success. For him, however, it was not a matter of establishing the limits of its validity, as though to enhance the reputation of philosophical speculation, nor of developing a system of arbitrary methodological rules that would categorize any thinking that might in the future claim to be scientific. For Kuhn, on the contrary, scientific activity incorporated perforce a whole set of metaphysical presuppositions linked inextricably to scientific concepts based on observation and experimentation: there could be no question, therefore, of requiring that science cast off a part of itself, as though such irrational beliefs were merely a foreign body surreptitiously introduced into the otherwise perfectly rational organism of scientific thought. In Kuhn's view, moreover, it was of no use to attempt to formulate a set of methodological rules that would be valid always and for ever, because it was clear from a study of scientific revolutions that such rules were either nonexistent and unnecessary, or were specifically defined within the various research communities and were consequently as subject to change as the communities themselves.

What Kuhn's book revealed with particular clarity was the mechanism through which these communities successively formed and reformed like so many "invisible colleges," ensuring dissemination of results obtained and peer recognition of the value of research done by particular individuals or teams. Kuhn showed in this way that, although a group might be held together by what could be described as a sharing of the spinoffs of a particularly impressive and promising scientific achievement, its continued existence depended on its ability to expand and thus to attract young minds. It was to some extent through the schools, more directly through various training programs in the universities, and primarily by means of textbooks that scientific communities were able to preserve their ascendancy over possible rivals and ensure the dominance of their methods and their views for as long as possible. These textbooks, according to Kuhn, tended to obscure the earlier history of the discipline by tracing only the direct line leading to the current theory. They set down the relevant questions open to research, among which those successfully resolved established the accepted standards of excellence. And finally, they propaga-

ted, more or less consciously, the particular values of existing groups, whether these were of a cognitive nature, such as the degree of precision in measurement or accuracy in calculation, or ethical and political values, such as absolute respect for life or private ownership of the means of production.

If Kuhn is right in his belief that science is a collective activity and that its social status is to all intents and purposes permanently guaranteed by an interrelationship between those who possess knowledge and those who have not yet acquired it, then the process to be analyzed is indeed that which takes definite form in the university because it ends there, namely, the "training of scientific minds," to paraphrase a title by Gaston Bachelard. It is important to realize, however, that this process begins long before university, that it begins in fact in school, at the elementary level, and accelerates on entry to high school. Thus what students are given in biology, chemistry and physics classes (as well as in geography, history, mathematics and in some cases social science classes such as economics) cannot be reduced to a mass of objective and impersonal facts to be stored away in their memories until needed. First and foremost, a particular image of what science is and what it claims to be is communicated to the students as they become acquainted with the results achieved in these disciplines. Science teachers, voluntarily or not, consciously or not, serve not only as purveyors of a store of theoretical knowledge, but as means through which scientific activity is legitimized and given value. They convey a concept of science at the very moment when they may think they are merely transmitting accepted knowledge. This, in essence, is the working hypothesis from which we will proceed in the analysis that follows.

The Myth of Scientism

We believe that a certain concept of science can be identified, at least in certain essential respects, in the teaching of science at the high school level. By a concept of science, we mean a series of more or less spontaneous opinions and fairly solidly entrenched beliefs that are interdependent and usually considered to be self-evident. These opinions and beliefs deal with scientific activity or practice, its meaning, scope and validity from a specifically cognitive point of view, or what we shall hereafter term its

legitimacy; they relate also to its purpose, interest and merit in moral and sociopolitical terms, or what we shall refer to as the value of present-day science.

This concept of science, to some extent reasoned among teachers and even among science practitioners themselves, we shall designate by the term scientism. Inasmuch as we think that such a concept creates an illusory image of scientific practice, we shall describe it as a kind of mythology or, in other words, as a series of interrelated representations that can be critically examined. We will be speaking, therefore, of the scientistic mythology as a type of creed that embodies various articles of blind faith in scientific activity. The primary function of such a dogma seems to be to inculcate in the minds of young students a receptivity to the various types of scientific information they will be required to retain. In this way, while the students are learning to manipulate certain theoretical or experimental concepts, they are themselves being manipulated: their approach to science is being shaped not only by the presentation of some of the least controversial scientific findings, but by the superimposition on those few findings of an interpretation of scientific practice that portrays it as an activity above all possible suspicion.

Scientism implies an attitude toward science that sees it not only as an activity involving special knowledge, because of its specific and time-tested method of solving problems, but as one with a cognitive basis that is beyond question. Scientific activity is thus immune to criticism, because any criticism, to be considered scientifically valid, must itself be scientifically based. Only through science can we be assured of the accuracy of any concept; it is the application of a method governed by strict rules that ensures the conquest of truth; it alone can establish the soundness of our claims to knowledge, and, what is more, it does this by accumulating progressively, through observation and experimentation, definitive answers to the questions that human beings pose. Scientism is thus, in our view, both the attribution to scientific activity of an exclusive claim to legitimacy and the active belief that science itself justifies its particular status, because a valid answer to any

question pertaining to it can only be found through the application of its comprehensive method.

This attitude exaggerates the legitimacy and value of scientific activity: science is believed to be the source of all truth, not because the scientific method stresses the importance of controls to ensure the reliability of its findings, but because no question worthy of interest can be dealt with other than by experimental science. If science is seen as a practice that actually controls the truth, that alone is capable of monitoring its own claims, science becomes dogmatic, based on revelations experienced by the more enlightened, which others simply have to take on faith unless they can repeat the method leading to the one and only possible vision.

Does the scientistic mythology not soothe us with illusions? Are things exactly as the scientists say they are? Do they have direct access to an unlimited range of observations from which they can draw conjectures and hypotheses with little risk of error? Have they discovered, through experimentation, a royal road to truth, and can it be assumed that the increased development of scientific research during the last 50 years is resulting in a progressive revelation of the truth, the whole truth and nothing but the truth? Finally, can we really trust all these disinterested experts who are said to be working for the greater good of suffering humanity, as though they were gradually going to relieve us of all our worries and remedy all our ills?

The Epistemological Factor

Epistemological research today rejects all this mythology. Let us return for a moment to Kuhn.

Although Kuhn emphasizes the role of teaching in the formation of learned communities, he attaches little importance to epistemology. In his view, epistemological criticism has a real role to play only in a crisis, when accepted ideas in a field of research dominated by a paradigm are fundamentally shaken and the discipline concerned is forced to abandon its convictions and adjust to a radical change. The epistemological reflections of Ernst

Mach, for example, critic of the Newtonian concept of absolute space, whose work made possible the Einstein revolution, show this clearly.

Although epistemology may be relegated to an unobtrusive, even incidental role in scientific practice, the same is not, or need not be true in science teaching. And here, although our original hypothesis uses the Kuhn proposition, we will try to emphasize and extend its practical application, even at the risk of disturbing Kuhn's most enthusiastic adherents. Kuhn clearly implied that science is a successful activity and no purpose would be served by trying to change its methods. However, the teaching of science certainly presents a problem; our reflections are based on a recognition of this fact. In our view, the next step must be *to ensure that science teaching at the high school level is based on the objective of instilling in the students a critical approach to scientific activity, as opposed to scientistic mythology.*

Contemporary epistemology must provide the conceptual framework for such a critical approach. To the extent that epistemology is the analysis of accepted ideas about what is considered to be science, it can give those who are training scientific minds an opportunity of reflecting on the value and legitimacy of the image of science they are portraying. Scientism clearly runs counter to the genuine legitimacy and value of science. And if the current practice of science cannot be dissociated from the practice of science teaching, an epistemological analysis of science education may be a very effective way of improving the pedagogical relationship between the science teacher and the student, and of gradually changing the calibre of minds that high school teachers will be introducing into the enlightened world of contemporary science. Inasmuch as the image that science teachers project is the first clear-cut image of scientific activity that students receive, teachers must realize that they have unwittingly accepted an absolutist representation of this activity. It is important also that they become aware that this representation borders on fetishism, that they are to some extent presenting science as the true religion to which all must convert. They must decide not only whether the concept of science they are conveying to their students is defensible, but whether the questioning of this concept may not be the thread

that will lead students out of the scientistic labyrinth in which they are in danger of being held captive for a lifetime.

The results of this decision might even suggest that epistemology could point the way to a revolution in the teaching of science.

III. NAIVE REALISM

That Scientific Knowledge Is the Reflection of Things as They Actually Are

Perhaps the most persistent idea, and the strongest, most indelible and seemingly indispensable image, is that of an existing fact, which in general we identify with the world, the universe, or reality. It is the idea that before we become aware of anything, there already exists something to become aware of. This idea is inextricably linked with the other notion that thinking is in some way a passive activity involving the reconstruction of the order of things as they actually are. This epistemological position is called naive realism. Strictly speaking, however, all contributions to scientific thinking are in some way constructed. The ideology of common sense requires science to continue the daily awareness of real life, and scientific language to be nothing more than a specialized form of ordinary language. Although the various kinds of technical language developed by scientific disciplines are derived from everyday languages and they must necessarily be capable of at least partial interpretation in everyday language to be understood, everyday language is itself a symbolic reconstruction of the world around us. To think that reality is immediately accessible - when in fact we can gain access to reality only through the medium of language and when matter can exist for us only through symbolic forms - is equivalent to believing that the world comes to us ready-made.[1] It is just as false to think that the world is limited to the representation one has of it as to imagine that it is possible to know what the world is like outside of any representation. The universe cannot be reduced to the boundaries of human speech, but it is not accessible without the language that permits its representation. In this way, the limits of the world are the limits of language.

This is not to suggest that the world is simply a construct of the human mind and that each individual is free to fabricate the world that subjectively suits him or her best. Language, as an instrument of communication as well as of representation, is not a private tool but a social process. The exchange of views between human beings, or in other words, intersubjectivity, is the basis of objective thought. What we have agreed to call science is nothing more or less than the process by which we collectively construct a representation of reality. And because science takes place within the context of language, the realities to which its theories apply become extensions of the universe represented in speech.

Symbols thus intervene between subject and object, between nature and physical theory, between society and sociological theory, between reality and its intersubjective representation. Scientific scholarship makes use of such symbolism. Symbols and signs do not reflect the world, but they refer to it. Science is not merely a copy of reality, a neutral medium giving access to something immediately available, it involves activity and construction.

Pedagogic Neutralization

The epistemological belief that we see things as they really are is deeply rooted in western mentality. To a large extent it determines our behaviour, even though we realize that we are the architects of our own vision of the world.

The metaphor of the map and the topographical area it delineates, which we owe to Alfred Korzybski, makes this clear. As another author has explained it:

> The map, everyone readily agrees, is not the area, although it is a very convenient representation of it. The map makes it possible for us to find our way, to foresee obstacles in our path, to visualize irregularities in the terrain, to identify towns and cities; in short, it provides information that can be used in a variety of ways, from organizing a plan of attack against an enemy to planning a sightseeing trip. Thus, by the use of conventions and signs, we are able to visualize reality clearly enough to be capable of effective action, provided we can interpret these conventions and symbols. The proof of this is that we can show the map of an

> area to a local inhabitant, who in all likelihood will not make the connection between the representation on the map and the district he or she knows so well in another way. No matter how precisely the map is drawn, however, it will still be a representation of reality, and no amount of detail will represent the dimensions of that reality.[2]

In brief, the knowledge we have bears a resemblance to the area, but it is not identical with it.

The use of conventions, signs and symbols to represent reality is an abstraction, and in this sense the map constitutes an abstract knowledge of the area, and not a concrete, first-hand acquaintance, such as that possessed by the local inhabitant who has travelled through it in every direction. This abstract and rational knowledge is made possible by the intellect, the function of which is to discriminate, divide, compare, measure and categorize, but as Capra points out,

> ...in order to compare and to classify the immense variety of shapes, structures and phenomena around us we cannot take all their features into account, but have to select a few significant ones. Thus we construct an intellectual map of reality in which things are reduced to their general outlines. Rational knowledge is thus a system of abstract concepts and symbols, characterized by the linear, sequential structure which is typical of our thinking and speaking.[3]

This is also, in substance, the nature of scientific knowledge, that is, an abstract, intellectual representation of phenomena constructed for the purpose of predicting their behaviour. Science as knowledge is an intellectual construct, and what are referred to as the laws of nature are merely the result of this human activity. Nature as such does not have laws, but its behaviour can be described and predicted on the basis of laws and theories formulated by scientists.

In the following pages are presented some activities aimed at inducing students to reflect on the nature of their own learning experience. Others can, of course, be devised, the number being limited only by the scope of the teacher's imagination.

Activity 1: The Map and the Topographical Area

We have used the metaphor of the map and the area it delineates to illustrate the relationship that exists between scientific knowledge and the subject of such knowledge. We now suggest that the same metaphor be used as an aid in teaching science at the high school level.

As a first exercise, we propose that the students produce a map of an area familiar to them (the schoolyard or the street, for example). This exercise is at an appropriate level of complexity for students of this age, because it involves simple techniques using geometry and triangulation. One obviously cannot expect an expertly drawn map from the students on their first try, but they may produce surprisingly good results.

When the map is produced, the students may begin to understand the purpose of the exercise. They will readily admit that their maps are not like photographs (iconic models) of reality, but functional symbolic representations. Maps locate certain spaces in relation to the north-south coordinates and people can use them to get their bearings within thess spaces, to travel from one point to another, to recognize particular features, and so on. They will also find that they have used signs, conventions and symbols to represent certain aspects of the reality, and as they compare their maps with those of other students, they will realize that more than one kind of map is possible. At this stage, a profitable discussion can be developed on the basis of the following questions:

1) What criteria were used to select the elements represented on the map?
2) Is there a similarity between these elements and those shown on the map?
3) Does the map reflect the complexity of the reality that it is intended to represent? (It may then be suggested that a further map be drawn for a part of the area, leading to the question of how many maps would be needed to exhaust the reality.)
4) Does the map reflect the dynamics (changing aspects) of the reality it is intended to represent?

A discussion oriented along the foregoing lines should enable the student to grasp the main points, namely:

- that knowledge of the area, gained from a map, constitutes one of several possible representations of this reality;
- that the elements represented are the result of a choice that necessarily eliminates certain other elements;
- that regardless of how sophisticated a map may be, it remains an abstract and simplified representation of the reality.

Activity 2: The Voyage of Christopher Columbus

This is a multidisciplinary or interdisciplinary activity in that history, geography and science teachers can participate in developing it and carrying it out.

It is well known that Christopher Columbus's objective was to find a new route to the Orient. When he set sail on his voyage, his itinerary was based on existing information and also on the maps available at the time. What were these maps like? Did the sailors of that era really think they were accurate representations of the areas they depicted? To what extent did the expectations generated by reliance on maps influence the interpretation of observed phenomena? (It is reported, for example, that when Columbus landed in America, he thought he had reached the shores of China, and the fact that he brought some of the natives back from his expedition must have lent credence to his statements, as Marco Polo referred to them in his descriptions of China.[4]) How have maps developed? Are they an increasingly accurate reflection of reality, or do they make possible increasingly accurate predictions? Is it possible to produce maps that are completely free of distortion?

Cartography has undoubtedly made giant strides since the time of Christopher Columbus, but the map is still a geographical representation involving signs, symbols and concepts. By tracing the evolution of terrestrial cartography in this way, the students can be shown:

- that any representation can convey only certain aspects of the reality;
- that any representation influences action and the interpretation of phenomena in a definite way;
- that the evolution of representations constitutes progress in terms of more accurate prediction of events, although this evolution may involve occasional deviations or reversals;
- that no matter how many representations are produced, the reality can never be exhausted.

IV. BLISSFUL EMPIRICISM

That All Scientific Knowledge Derives Directly and Exclusively from Observation of Phenomena

With the evolution of modern science in the 16th and 17th centuries, the western world believed that it had discovered the perfect scientific method. This method consisted in first observing particular phenomena, whatever they might be, and then proceeding by generalization to the induction of an explanatory hypothesis. In this perspective, science had not only an absolute psychological beginning, namely observation, but a definitive logical basis, because the scholars' pronouncements were supported by irrevocable inductive reasoning. To characterize science as being essentially the meticulous, orderly, even exhaustive gathering of facts is to give way to blissful empiricism.

But what, after all, is a fact, and what language do facts speak? If a fact is only established by and for a particular observer, then a "pure and simple fact," in the usual sense of the term, is an illusion. A scientific fact can be said to be established only after its appearance has been reported and explained: to establish any fact therefore, a certain procedure to obtain consensus must be followed within the scientific community that proposes to consider the matter. A consensus on a particular fact usually presupposes a body of prior consensuses on the theories governing the various observations and procedures, as well as a provisional consensus on certain of the hypotheses that are accepted when the fact described and explained is claimed to be scientifically established.

Blissful empiricism views the human mind as a tabula rasa on which knowledge is recorded item by item: this leads to a belief that the mind of the young student is as so much virgin wax to be imprinted with the phenomena of the physical universe. The truth of the matter is that students have already acquired considerable knowledge of the world by the time they reach high school, whatever may be the value of that knowledge. If it had no scientific validity, there would be all the more reason to attempt to dispel it. It is better to take the view that, whatever the stage of intellectual development, a cognitive level has already been attained at which prejudices and illusions on the one hand and established facts and acceptable judgements on the other are bound together with a cohesiveness that is not always evident.

It is important to point out, moreover, that the facts are not the starting point of any scientific investigation. Until a point of view is adopted and an avenue of research clearly mapped out, no observation is possible because the investigation cannot get under way. The point of view itself originates with the formulation of a question or a series of questions. Unless the intellect is presented with a problem, no solution can be envisaged. The notion that scientific activity begins with facts and that observation, in the technical sense of the word, requires only an attentive eye and an open mind is an epistemological fallacy.

If the interplay of science is made up of an endless series of questions and answers, then the answer to every question is usually to some extent foreseen. And indeed, observation is fruitful in terms of the confrontation of the anticipated answer with the information collected. At best, this sort of heuristic process results in the development of a hypothesis or a series of conjectures that can be tested.

Pedagogic Attenuation

To observe usually means to look at attentively so as to note as many details as possible. Inasmuch as this is the accepted definition among the majority of student science teachers, it would not be surprising to encounter it among young teenagers.

Apart from the fact that the latter are unconsciously influenced by their respective cultural environments, the epistemological schema prevailing in their elementary schools is generally that of blissful empiricism, which only reinforces their belief that they see things as they exist in reality. It is taken for granted that to look at something attentively is to observe it, because according to this epistemological approach, observation consists of noting facts. (By this schema, the falling apple would have had the same significance for Aristotle as for Newton.)

The adolescent mind is not a lump of wax to be moulded, and if there is to be any significant change in the beliefs and the intellectual habits of students, teachers must constantly bear in mind Gaston Bachelard's reminder that the mind is no longer young when it approaches scientific education: it is as old as its prejudices.[5] The fact that these beliefs and habits are resistant to change is one of the conclusive findings of current research in the field of scientific education.[6]

The concept of observation common among young teenagers is indissociable from the epistemological concept of naive realism, and there can be no evolution of one concept without a corresponding change in the other. It may be said, therefore, that to discuss with students the problem of the nature of scientific observation is to invite them to adopt a more comprehensive approach that gradually leads to a new attitude toward science.

The activities suggested below provide the students with an elementary model of the observation process that will enable them to realize:

- that observing is a process that differs from simply looking at something;
- that observation necessarily involves cognitive disequilibrium and questioning;
- that making assumptions is an essential part of observation, and that the assumption guides the collection of data.

Activity 3: I Listen, I Smell, I Touch - and I Look with My Ideas!

This activity can quite easily be made into a game. It involves identifying a number of hidden objects (five to seven) selected according to the following criteria:

- a rigid nonconductor
- a metallic object
- one or two liquids
- one or two granular substances
- an object unfamiliar to the students

a) I Listen

In the first phase of the exercise, the students attempt to identify the object from the sound it makes when dropped two or three times from a certain height. They are asked not only to try to identify the object from what they hear, but to explain the reason for their conclusion in writing.

The written notes are important because the role of the resource person will be to prompt the students to think about their approach. A student may have written, for example, that item 3 is a liquid, "because I've already heard a similar sound and it was made by a liquid." This is a good opportunity to point out to the students that what they already know has influenced their interpretation of what they have perceived.

b) I Smell, I Taste

In the following phases, the students will be allowed to smell, taste and identify the objects again, writing down their reasons for their conclusions. The role of the resource person at this stage will be to analyse with the students the information they have set down. A number of possibilities may arise:

1) The nature of the object cannot be stated more positively on the basis of the new information, and the original assumption is accordingly maintained.
2) The new information tends to support the original assumption, in which case it should be shown how this makes it possible to classify the information.

3) The new information tends to cast doubt on the original assumption, in which case it should be shown how this assumption, although questionable, has nevertheless been useful in classifying information.

At this stage of the activity, the students should be asked to predict what they will perceive when they touch the items. From the amount of information they have and the assumptions they have made, it is possible to make predictions. This part of the exercise is important in that it illustrates the extent to which assumptions (as already known) influence the collection of information.

c) I Touch

This phase can be divided into two stages - first touching the objects without moving them, and then handling them. At each stage the students are asked to write down the information acquired and to compare it with the predictions they made on the basis of their assumptions.

This part of the exercise is valuable in that:

- it shows that perception requires action on the part of the subject and that only differences are actually perceived (for example, an unvarying sound that could not be contrasted with any other would no longer be distinguished by the subject);
- it emphasizes that the process of observation includes the comparison of the events predicted on the basis of assumptions with the information gathered through perception.

d) I Look

The moment has finally arrived to lift the veil on the mystery, and the students will undoubtedly be eager to see the hidden objects. Before they are allowed to see them, however, they should again be required to predict what they will see and to write down their predictions with supporting reasons. This is important because these notes will be used to demonstrate to the students:

- that observation in the scientific sense of the term is a process that starts with the question: what is the nature of the object?;

- that observation involves making assumptions, even though expectations may have to be revised in light of the information gathered (and that what is assumed is always related to what is known);
- that observation does not consist of looking, touching, listening, tasting and smelling, though these processes involve perception.

It may surprise the students to discover that even when they can see the object, it is not automatically clear what it is or what it is for. This is a good opportunity to initiate a real observation exercise, this time involving all the senses.

The activity we have suggested contains nothing particularly new; teachers often organize projects to demonstrate to students the role played by the senses in scientific activity. It is in the method of operation, however, that a basic difference can be noticed.

The objective of the activity is specifically epistemological, in that it is designed to help the students to become aware of their own thought processes and to realize that observation requires prior assumptions and that ultimately seeing, listening, smelling and tasting are predetermined by ideas. This is a difficult undertaking and the proposed objective will probably not be achieved with this one exercise. By maintaining great vigilance throughout the year, however, the teacher may succeed in shaking the students' naive conviction that observation is a passive activity involving nothing more than noting facts.

V. CREDULOUS EXPERIMENTALISM

That Experimentation Makes Possible Conclusive Verification of Hypotheses

There is a great sense of security in the thought that science is able to establish beyond all doubt what should be believed or disbelieved. It is readily accepted that in the course of their work, scientists may question established concepts, or even the validity of their own hypotheses. People take comfort in the idea that there exists a straightforward route to absolute truth, namely, experimentation. And they imagine that when incompatible theories conflict on grounds of fact, science can resolve the difficulty using a critical experiment, that is, by the development of an experimental procedure that will show that if one of the hypotheses in question is false, the other is necessarily correct, and vice versa.

The experiment conducted by the French physicist Léon Foucault in 1850 is usually cited as a prime example: he developed a method by which he could measure the velocity of light in water and in air at the same time. It had been accepted that if light had a corpuscular structure, it would travel faster in water than in air, and that if it had a wave structure, the reverse would be true. Foucault believed he could conclusively confirm Augustin Fresnel's wave theory (1819) and demolish for ever Isaac Newton's emission theory (1675). Foucault's method consisted in "determining the angle at which a rapidly rotating mirror turned in the time required for the light ray to travel a return distance of a few metres between that mirror and another, strike the latter and be sent back to the first."[7] Foucault calculated that the velocity of light was only 221 000 km/s in water and 298 000 km/s in air; this was accepted as positive proof of the wave theory. As we know now, however, Einstein in

1905 produced his interpretation of the photoelectric effect based on Planck's quantum theory, and in 1924, Louis de Broglie developed his synthesizing theory of waves and particles. This latter theory, which postulated the existence of a wave in association with every moving particle, was corroborated experimentally by Davisson and Germer's fortuitous discovery in 1927 of the diffraction of electrons by crystals.

What conclusion can be drawn from this example? First and foremost, that it is important to distinguish between experimental proof and mathematical demonstration. In the 17th century, Galileo gave physics a mathematical formulation, and Newton rejected the a priori hypothetical method, maintaining that natural philosophy allowed only mathematical demonstrations. The interpretation of nature in mathematical terms marks the dividing line between the qualitative science of mediaeval times and that of the modern era. The modern approach to science, governed entirely by mathematics, was characteristic of Descartes, among others. This approach led him to use trigonometry to explain the angles of incidence and refraction of light rays (1619); exact tables of these angles had long existed, but the mathematical explanation required the sine concept. The general proposal that the secrets of nature could be deciphered like so many coded messages originated in the time of Galileo; not only was science transformed, but considerable impetus was given to the development of mathematics as well.

Expressed in mathematical terms, nature became a machine, and western civilization, having developed a precise way of thinking, began to believe that it transcended nature and was superior to it, and that it could even use nature as it saw fit. However, although the use of mathematical formulations in physics resulted in true scientific objectivity, it was accompanied by increased experimentation. Indeed, at the same time that explaining was believed to consist essentially in providing a "geometric representation," it was believed equally strongly that explaining nature amounted, in the final analysis, to the artificial construction of "mechanical models" that illustrated the real forces and principles operating in the world. Reliable as

mathematics may be, it provides at best only one of several possible interpretations of observable phenomena. The progression from fact-gathering to explanatory hypothesis is not inevitable, and hypotheses, however infallible they may appear, are always subject to revision.

Pedagogic Elimination

During the past 20 years, there has been a good deal of emphasis in scientific education on the need for students to carry out experiments in the laboratory. This was a natural outcome of the new orientation proposed for scientific curricula. Instead of simply being taught a series of facts and laws, students were to be initiated into the physics of the physicist, the chemistry of the chemist, the biology of the biologist: they were to be trained in science, rather than merely informed. A thinking mind was to replace the head filled with facts, in accordance with the principles of active pedagogy. These general intentions were given concrete expression in such objectives as:

- assimilation of scientific thinking;
- assimilation of experimental method;
- assimilation of the integrating concepts;
- assimilation of scientific attitudes (critical approach, systematic doubt, and so on).

These subsequently materialized in the form of such pedagogical developments as PSSC, CHEMStudy, BSCS and the various regional or national adaptations that followed. In short, although the students would not be actually rediscovering the various scientific laws and theories, they would be given the necessary means to trace the steps leading to their formulation.

The enthusiasm aroused by the application of this new concept of science teaching was probably unprecedented in the history of pedagogy. Teachers, planners and instructors united in their efforts to achieve the objectives of the reform. Now that some 20 years have elapsed, what assessment can we make of the outcome?

There have been a number of studies in the past four or five years. The following are some extracts from an analysis by Welch, Klopfer, Aikenhead and Robinson,[8] which is one of the least outspoken:

> In spite of new curricula, better trained teachers, and improved facilities and equipment, the optimistic expectations for students becoming inquirers have seldom been fulfilled (p. 33).
>
> Although teachers made positive statements about the value of inquiry, they often felt more responsibility for teaching facts, "things that show up on tests," "basics," and structure and the work ethic (p. 37).
>
> The second major reservation teachers expressed about inquiry teaching was that it didn't work for most students. They see it as causing confusion and too difficult for any but the very brightest student (p. 37).
>
> ...most students are unlikely to be given opportunities to learn even the simplest process skills, much less the more involved aspects of scientific inquiry (p. 38).
>
> Science was something teachers took in college, but it was not something they experienced as a process of inquiry. It is not surprising then to find creative inquiry was not what we found in those eleven high school laboratories - except in rare circumstances (p. 38).
>
> The values associated with speculative, critical thinking were often ignored and sometimes ridiculed (p. 39).

It seems clear from this list of quotations (which could be extended almost indefinitely), that the objectives proposed two decades ago have not been achieved. Students have not assimilated the knowledge, the skills or the attitudes associated with scientific thinking or with the experimental method. It is also safe to say that they have given no thought to the status of experimentation in the scientific method.

The conclusions that must be drawn from the studies referred to are hardly surprising. The teaching of science at the high school level, in the great majority of our schools, is organized in terms of the most questionable pedagogic hypothesis imaginable. We would express it as follows:

> The 32 students in class X will formulate in a given week, on the same day and at the same time, the same hypothesis relating to the solution of the same problem. And they will verify it with identical experimental apparatus.

The foregoing summarizes, in an abbreviated form, the essence of the situation, which is that under present conditions, the work done in the laboratory by students can be no more than a simulation of the method followed by scientists. The hypothesis is established by the teacher, and the students' task consists of manoeuvring to arrive at the predicted results. As a rule, most of the students are uncertain as to what is involved and they merely carry out the directions in the laboratory guide step by step, as though following a recipe. The validity of the results obtained is seldom questioned, and if by chance the experiment fails, the teacher imposes a conclusion. The students are asked to write a laboratory report, which will be corrected, but the results are rarely used in class.

In such circumstances, it is not difficult to understand why the students do not assimilate the skills and the mental attitudes associated with the experimental method. The fact is that they do not experience the situation; at best, they merely verify what the teacher has decreed and imposed, often arbitrarily.

Activity 4: A New Type of "Black Box"

There would appear to be a limited number of ways of making students aware of the role of experimentation in the development of scientific knowledge. It is essential that they personally experience the situation, but this obviously presents practical difficulties. How, for example, can a problem be devised that is within the capabilities of these young minds and that at the same time offers scope for experimentation?

A "black box" is often recommended to teachers as a teaching aid. The students are given a sealed box containing a number of objects and asked to describe the contents without looking inside. They may shake the box to try to recognize familiar sounds or may move a magnet over the outside to detect

the presence of metallic objects, and so on. Their predictions are then compared with the contents of the box, to illustrate the similarity of this activity to the quest for scientific knowledge.

This exercise, although interesting, is limited in that it does not allow for measurement, offers little scope for model-building because it requires only that objects be classified, and presents an inaccurate picture of scientific activity because it concludes with the opening of the box. To compensate for these deficiencies, we propose a new type of "black box."[9] This is, in fact, an exercise in model-building that uses the very simple device illustrated in Figure 2.

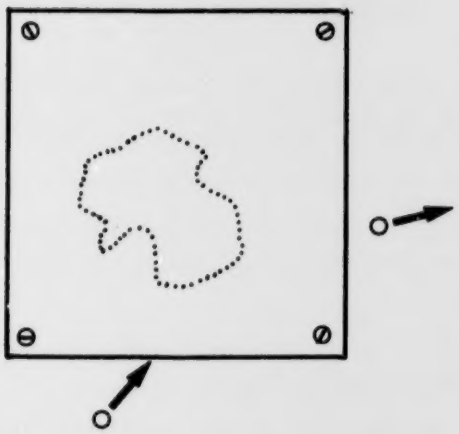


Figure 2: The Black Box

A piece of plywood is placed over a metal form on a table and attached with a screw or bolt. The space between the table and the piece of plywood is just high enough to allow a steel ball to pass through and strike the metal form. The form and the plywood are painted black so that they are not easily distinguishable, because the object of the exercise is to produce a model of the form by rolling balls and analyzing the trajectory.

The teaching strategy we are suggesting may be described briefly as follows:

1) The students in the class constitute a microcosm with characteristics resembling those of the scientific community.
2) The students are divided into teams of two or three, representing research groups.

3) Decisions as to the validity of the models are made by the entire group.
4) The teacher acts as group leader and promotes discussion of the epistemological aspects of the exercise.

This is not a definitive description, and variations of this activity can probably be developed to suit teachers' particular requirements.

a) Identification of the Form

The first exercise for the various teams is to create an iconic or geometric model of the concealed form by rolling the ball as often as necessary, analysing the trajectories, and in this way tracing point by point a model of the hidden object.

The purpose of this exercise is quite simple. It is to show the students that it is possible to gain knowledge of an object without actually seeing it or receiving information from it directly though the senses. However, the students must not see the form or be able to compare their drawings with it when completed. It is more interesting also, in our view, to have them work on a complex form from the outset, so that the various teams can compare their models. In brief, a situation is created similar to that encountered in science, in which the model selected is the one best suited to predicting the behaviour of phenomena.

At this stage, an epistemological discussion can be initiated and a state of cognitive disequilibrium induced among the students with questions such as the following:

1) How many times would it be necessary to roll the ball to be absolutely certain of the nature of the concealed form? 10, 100, 1 000, ... 1 000 000, ...?
2) If the experiment were repeated elsewhere, at different times, would the results be the same?
3) Is the form that has been sketched identical with the object to be identified?
4) Is the knowledge obtained by means of this procedure simply a reflection of what is under the piece of plywood?
5) How can it be decided collectively which is the best model?

b) Improving Predictions

If the hidden form is relatively complex, the iconic model will be only a rough approximation of it. How can events (the path of the ball) be predicted more accurately?

The students can be asked to measure the angles of incidence and of reflection associated with the trajectories of the balls and to transfer these values to a graph. This gives them a different tool with which to make predictions, because by interpolation or extrapolation, a value θ can be identified for a value α. Are these values more accurate than those obtainable by means of the geometric model? How can one be predict values for θ with certainty when value α lies between two measured values? Is it necessary to postulate the continuity of the form? What is an acceptable degree of accuracy for the measurements? Questions such as these lead students to think about the problems experienced by scientists.

And again, a state of cognitive disequilibrium can be induced in the group by a series of appropriate questions, such as:

1) Is it absolutely necessary to construct a geometric model of the form in order to predict events?
2) Does the graph constitute knowledge of the object?
3) Does this knowledge accurately reflect the nature of the object?
4) Is this knowledge as valid as a geometric representation?
5) Do the experiments carried out prove the hypotheses beyond all doubt?

At this point the validity of the knowledge derived should be questioned. Are the values of the angles affected by other factors, such as the velocity of the balls, their composition, the type of surface on which they are rolling, and so on?

c) From Graph to Equation

The next step is to ask the students to formulate a law from which the behaviour of phenomena can be predicted, or in other words, to express the relation between the angle of incidence θ and the angle of reflection α in the form

of an algebraic equation in which $\alpha = f(\theta)$. When θ is known, α can be predicted and there is no further need for geometric intuition.

It seems necessary at this stage to raise further questions that may result in cognitive disequilibrium. The students may be asked, for example, whether they think an equation constitutes valid knowledge of the phenomenon. Does this knowledge correspond to reality, is it necessary to know what lies beneath in order to predict the behaviour of the phenomenon, is there really something underneath? How many experiments must they carry out to be absolutely certain of what they are predicting?

d) From Causal Reasoning to Probabilistic Reasoning

It is quite easy to create a situation that will require the students to use probabilistic reasoning. It can be done by simply moving the form slowly around its axis and thus causing it to change. It then becomes difficult, if not impossible, for students of this age to determine the shape of the form. This makes for an interesting introduction to probabilistic reasoning in science. The best they will be able to do is predict that for a value α, value θ will probably lie between θ_1 and θ_2. But does this constitute valid knowledge of the phenomenon? What kind of certainty does the experiment provide in this case?

The use of the kind of device we have just described to simulate both scientific experimentation and the behaviour of a scientific community requires considerable skill on the part of the teacher. However, it can certainly help to set the students thinking along epistemological lines about the nature of scientific knowledge and the role of experimentation in the development of that knowledge. Particular care should be taken to prevent the students' seeing the form, so that they will not think that they really know what it is.

In conclusion, the conceptual change envisaged in this section can only be achieved over the long term. The exercises suggested are not enough to bring it about, and it is therefore essential that the teachers consider this type of instruction to be as important as the standard curriculum.

VI. BLIND IDEALISM

That the Scientist Is a Completely Disinterested, Objective Being

The image still lingers of the scientist alone in a study or laboratory, wrestling with the mysteries of facts that have hitherto defied all reasonable explanation. The researcher is pictured as an individual cut off from all associates, deliberately severed from the rest of the world because of a refusal to accept the prevailing ideas of the time, seeking, single-handedly, to penetrate the enigma of certain events or phenomena. Imagination sees this creative genius inventing instruments for measurement and analysis and discovering, sometimes aided by chance but invariably by native ingenuity, the answer to the previously unsolved problem. The scientist is commonly regarded as a person apart.

This individual is assigned, moreover, a placid, imperturbable and dispassionate nature that remains unmoved in the face of difficulties that would unsettle most people, and immune to the adverse effects of emotion on rational thinking. The research scientist is envisaged as a pure spirit, a being on a higher plane, capable of remaining detached from the surrounding world and exercising powers of thought with complete objectivity, untroubled by the concerns that usually beset lesser mortals and distort their perception of things. From this point of view, to be a scientist is to be untouched by material ambition, by the quest for prestige and glory, by the desire for professional advancement, by the lure of money and power. It is, on the contrary, to allow no personal preference to sway one's judgement, to eschew the arbitrary conclusion, to adhere strictly to the facts, rejecting out of hand any value judgement that betrays a subjective bias. The scientific mind is

governed solely by the desire to know, and such is its hunger for truth that enlightenment is its own reward.

It is high time that the myth of the disembodied scientific mind was laid to rest. The history of science has long been mistakenly envisaged as an uninterrupted series of remarkable episodes that demonstrate the well-nigh miraculous inspirations of the impartial mind. Surely it is obvious that such a dramatization of scientific research not only discourages interest on the part of ordinary mortals, but leads them to regard it as an activity from which they are excluded. If an aptitude for science is uncommon and limited to the brightest minds, why do so many try to gain some understanding of it? Although the written history of science may recount only the more spectacular successes or scientific revolutions, science itself is essentially "normal." Indeed, although remarkable achievements such as those of Copernicus, Newton, Darwin, Marx, Freud or Einstein may have so stirred the thinking of their time as to give rise to a radically new research tradition with its problem formulation, its conceptual framework, its methodology and its presuppositions, these successes were not due to chance and the time was ripe for their achievement.

Science is preeminently a social activity. Whatever personal aptitudes may be required, and they do exist, scientists are no more brilliant in their area of expertise than are craftspeople, artists or creative thinkers in theirs. Scientific activity is not carried on in isolation: researchers benefit from the work done by others before them, as well as from the work of their contemporaries, whether they agree with it or not. A scientific theory may appear to be the result of one individual's personal dedication, but it is really an cumulation of various endeavours, breakthroughs and/or stalemates, and as such, is the consequence of a collective effort that is very often overlooked.

Objectivity, in this context, is not an attitude that one adopts while communing with nature or that is attained by ridding oneself of prejudice and personal motivation. The objectivity required in research is more in the

nature of an attitude toward others: it is characteristic of those who claim to have sound arguments to support a particular explanatory hypothesis and who welcome discussion and examination of their arguments. It is not necessary that there be no personal preference or interest. The only requirement of any hypothesis is that it be open to testing. Any argument is objective and acceptable to the extent that it lends itself to verification. This verification is aimed at establishing not so much the truth as the validity of the argument (that is the absence of convincing reasons for disregarding it, attaching no importance to it, ignoring it temporarily or dismissing it on technical grounds). To believe that the particular social conventions governing scientific practice rule out strong feelings, neutralize the individual interests of all and sundry and are centred on the will to know betrays an excessively idealistic and illusory conception of the type of objectivity this activity requires. Interest is no obstacle to objective scientific cognition; it is rather a constant stimulus.

Pedagogic Denunciation

We have so far suggested a number of activities to help students experience the process of objectification as way of combatting blind idealism. To continue along these lines, the next necessary step is to introduce the history of science.

The history of science could be described as a poor relation to science education. It would not take much research to appreciate the dearth of historical content in science teaching. A cursory examination of curricula and textbooks and a minimal acquaintance with teaching practice will show that science history is of very little concern to those involved in this area.

The situation can be summed up as follows:

1) Textbooks, if they do not completely ignore the history of science, usually summarize events by associating various laws with their discoverers (Galileo, Newton, Dalton, Mendel and so on) and thereafter referring to Galileo's, Newton's or Mendel's law, as the case may be.

There is occasionally an account of the line of reasoning that led a particular scientist to the discovery of a new law, but this is invariably oversimplified. Here and there, a few biographical notes can be found, describing the life and work of a scientist in the style of a eulogy.

2) In terms of daily activity, the majority of teachers make no reference to the history of science. If they do, it is generally no more than a reminder of what is contained in the textbooks. Science history is not carried beyond the anecdotal level of Newton's apple or Franklin's kite. If a teacher does dwell on a particular scientist, it will be to emphasize that individual's remarkable intuition, genius, dedication to work, tenacity, or austerity, or the significant contribution he or she has made to the advancement of science with its positive consequences (progress) for mankind. The best example is that of Pasteur, who was hailed during his lifetime as a benefactor of humanity: "He was a steadfast, honest worker who devoted his life to science and through his discoveries, saved thousands of lives."

3) In terms of curricula, one cannot really speak of an integrated history of the sciences. The logical organization of the material rarely permits integration, although occasionally the student may study models of phenomena that succeeded each other in historical succession.[10]

In short, as Russell points out,[11] not only is the history of science neglected in science education, but what <u>is</u> taught bears little resemblance to the history of science as produced by professional historians.

Because of the status of science history teaching in the general framework of science education, there is a risk that certain beliefs will develop or be reinforced, such as:

- that science develops in a linear, logical fashion, rather like the table of contents in a book;
- that advances in science are the result of the periodic efforts of men, and occasionally women, acknowledged to be in the genius category;
- that scientists are motivated essentially by the ideal associated with the development of knowledge;
- that science evolves independently of the socioeconomic and cultural context of the time.

In other words, blind idealism. This type of belief can only be weeded out if the history of the discipline is integrated with teaching. But what history?

Thomas Kuhn suggests that two main historiographical trends have given rise to two types of science history, which he defines as follows:

- internal history, concerned with the study of science as learning, as an area of knowledge;
- external history, concerned with the study of the activities of scientists as a social group in the context of a larger culture.[12]

Although this distinction shows, at first glance, that the history of science can entail very different types of study, there is a risk that it may lead to error. The history of science is, in fact, merely one aspect of the broader, more encompassing field of general history, which modern historians qualify as problematic, global, social and structural.[13] Problematic in that it poses questions and attempts to answer them, global in that it is concerned with humanity in all its aspects, social in that it extends to social groups, and structural in that it studies long-lasting phenomena. All history, including the history of science, possesses these characteristics.

In this context, internal history (although it may demonstrate, for example, that the development of scientific knowledge is not a continuous, logical, linear process) cannot really provide explanations, because it does not take into account the global, social and structural dimensions of historical phenomena. As Pierre Thuillier points out:

> Often as a result of caution, lack of awareness or lack of imagination, the sociocultural aspects of "science" and epistemology are brushed aside or almost entirely neglected; it is as though the problems related to scientific activity are to be studied primarily or even exclusively in the perspective of pure knowledge. This is, admittedly, a legitimate attitude: scientific theories have specific characteristics and undoubtedly warrant specialized epistemological study. In practical terms, however, whether we wish it or not, "science" has a social existence and numerous social ramifications (ideological, political, cultural, ethical, and so on). For this reason, I believe, it is important to take all its aspects into account and to consider it as a human institution (in the fullest sense of the term).[14]

In other words, a truly enlightening history of science involves a balance of internal and external history.

The Copernican revolution offers an interesting example of the necessary complementarity of historical perspectives. Harvey Siegel recalls a passage about the history of science taken from Harvard Project Physics, and points out how the authors stress the arbitrariness of the choice between the Copernican and Ptolemaic systems, and the extent to which this intellectual revolution was hindered by religious and social influences. The passage reads as follows:

> Apart from its apparent simplicity the Copernican system had no clear scientific advantages over the geocentric theory. No known observation was explained by one system and not by the other. Copernicus had a different viewpoint. But he had no new types of observations, no experimental data that could not be explained by the old theory. Furthermore, the accuracy of his predictions was little better than that of Ptolemy. As Francis Bacon wrote in the early seventeenth century: "Now it is easy to see that both they who think the earth revolves and they who hold the old construction are about equally and indifferently supported by the phenomena."
>
> In short, the sun-centered Copernican scheme was scientifically equivalent to the Ptolemaic scheme in explaining astronomical observations. But, philosophically, it seemed false, absurd, and dangerous. Most learned Europeans at that time recognized the Bible and the writings of Aristotle as their two supreme sources of authority. Both appeared to be challenged by the Copernican system. The freedom of thought that marked the Renaissance was just beginning. But the old image of the universe provided security and stability to many. Belief in a sun-centred rather than an earth-centred universe allowed a gain in simplicity. But it seemed in Copernicus' time to contradict all common sense and observation. And it required a revolution in philosophy, religion, and the physical science of the time. No wonder Copernicus had so few believers.[15]

In this context, it is plain to see that the evolution of scientific ideas cannot be explained without reference to a broader sociocultural framework. This example is, of course, incomplete, but it illustrates what we have said. Kuhn describes this necessary complementarity of the two approaches as a challenge for science history.

A critical and comprehensive history, therefore, is particularly in keeping with the aim of dispelling the mystique attaching to science. But to what extent are these objectives compatible with those proposed for the general teaching of history? The point of view developed by Christian Laville, Canadian representative at the Congrès international des Sciences historiques at Budapest in August 1980, shows a remarkable similarity of approach. He suggests, in fact, that the role of history teaching should be: "To develop the intellectual autonomy of the individual so that he may be in a better position to know, understand and explain present and past societies and may participate more effectively in the social movements and the collective choices that shape the future."[16] Does demystifying science not promote the development of intellectual autonomy in students? Is it not one way of allowing individuals and groups to participate in the choices and decisions of a society in which science is assuming an increasingly important role in every respect?

This similarity between the objectives proposed for the teaching of history and for the teaching of science goes far beyond broad generalities when one considers the nature of the skills, the knowledge and the attitudes required to make these general objectives feasible. Every teacher today realizes that students must assimilate the intellectual know-how and attitudes associated with the scientific method - the importance of integrating concepts rather than factual knowledge, the critical approach, the suspension of judgement and so on. There are striking similarities between these objectives and those proposed for the teaching of history if strictly disciplinary goals are excluded. But if science history is integrated into the teaching of science, there is not only a similarity but a convergence of objectives. In other words, by applying the criteria of historical science, the history of science can be integrated into science education in an intelligent way.

Activity 5: Watson and Crick

This first activity is not strictly speaking a lesson in science history. It is rather a suggested use of the well-known historical document The Double Helix to counter the excessive idealism associated with so-called scientific objectivity.

Watson's book recounts the discovery of the molecular structure of DNA from his own point of view and describes the interaction of the principal actors in this episode in the advancement ot science. The easy-to-read style of the book recommends it to young teenagers. They will be immediately struck by the fact that the participants in this intellectual adventure are moved and inspired by a variety of feelings and ambitions. These themes lend themselves to development in at least two ways.

a) Critical Analysis

The first step is to devise a questionnaire that will allow the students to identify the aspirations, ambitions and prejudices of the various actors. The students should also follow the process by which the authors of the discovery sought the necessary proof of their hypotheses through experimental testing. Finally, a discussion can be initiated based on such questions as:

1) Could Watson and Crick have made their discoveries without being aware of the work done by Wilkins and Franklin?
2) In what way are the authors indebted to Linus Pauling?
3) To what extent were the two discoverers motivated by the hope of winning the Nobel Prize?

b) Playing Crick and Watson

Why not develop a skit based on Watson's book? Some students might be interested in writing and then acting out such a skit for their classmates. This could give rise to a discussion between the performers and the spectators as to the interpretation of Watson's account. The group leader (teacher) could guide the discussion so as to bring out the objective nature of the scientists' undertaking and at the same time the subjective nature of their personal involvement.

Activity 6: Darwin & Co.

Events such as the hundredth anniversary of Charles Darwin's death provide a good opportunity to have the students undertake an exercise in critical history. A wealth of material appeared during 1982 about the famous Englishman who was the co-developer (with Alfred Wallace) of the theory of evolution.

How can this type of event be turned to account in a high school classroom? There are undoubtedly many ways, and each teacher will find the one best suited to the needs of his or her students, but we suggest the following teaching strategy:

a) Phase 1

The teacher tells the students, in a brief introduction, about the particular event being celebrated. He or she then suggests that they collect articles published in magazines and newspapers in connection with the anniversary.

b) Phase 2

When the collection is complete, the students begin the real work, which is to analyse the articles, noting especially:

- the way this particular figure is portrayed;
- the individual's scientific achievements;
- the controversies aroused by their publication.

c) Phase 3

In the case of a figure such as Darwin, the teacher may suggest a point of view along the lines of that put forward by Thuillier in Darwin & Co., in order to provide the students with a different impression from the one they may have gained from the articles. This should provoke a very interesting discussion. Questions may arise, for instance, as to why in Darwin's published writings the reader is never told of his metaphysical and epistemological interests, which had a significant bearing on his scientific concepts, and why Darwin did not protest more strongly against the adaptation of his ideas to social ends, particularly in the matter of the development of eugenics by his cousin Francis Galton. The intentions of the writers of the articles (which are almost invariably without real historical foundation) can also be discussed. It is important, however, not to lose sight of the main purpose of the exercise, which is to bring out the essentially personal character of Darwin's research.

The integration of science history into scientific education imposes new demands on science teachers. One does not become a historian simply by

claiming to be one, and the teaching of history carries its own particular requirements. It is a challenging problem, but change is possible, for between the present situation as described above and the ideal, there is clearly room for improvement.

VII. EXCESSIVE RATIONALISM

That Science Brings us Gradually Nearer the Truth

The more one tends to envisage reality as a totality concealing within itself its own essential, established and predetermined order that has only to be unveiled, the more one is inclined to regard science as a structure that is gradually being erected, story by story, on a permanent foundation acquired long ago. In these terms, science appears historically as an accumulation of well-established facts, of which the most recent additions are the most reliable. Scientific knowledge is seen as the steadily increasing illumination of a given truth by a clearly visible process, marked at each stage by an advance from initial preconception to increasingly informed judgement. The conquest of truth is viewed as a cumulative and consequently continuous process that has gone on, uninterrupted by precipitate change or sudden alteration, since the days of Babylon.

We call this epistemological position excessive rationalism. That the actual history of science can in fact be recounted as a gradual refinement of our opinions on reality, from what the Greeks called doxa, or generally unsupported common opinion, to what they termed episteme, or actual truth, is usually thought to be demonstrated by the improvement in our living conditions made possible through the technological benefits of applied science. Applied science may be regarded as a practical conquest comparable to that achieved in basic science at the theoretical level: once one understands how things actually function, one is free to exercise absolute mastery in the areas of perceptible appearance and current utility. Thus one proof of the validity of biochemistry is pharmacy, the proof of the advances in medicine from Hippo-

crates to Hans Selye is that people are now living longer and healthier lives, and the proof that Bohr's atomic theory went beyond that of Epicurus is Hiroshima and Nagasaki.

Leaving aside for the time being the ethical and sociopolitical aspects of this position, let us concentrate instead on its strictly epistemological interpretation. Is scientific activity really the continuing accumulation of observed facts and the cumulative continuation of a single grand theory by the addition to the initial overall concept of new ideas that have gained practical acceptance?

The gathering of facts without reference to their possible interpretation is meaningless: as we have already pointed out, unless a preliminary conceptual framework is outlined, at least heuristically, to allow for interpretation, the simple empiricism of collecting raw facts makes no sense. Not only does the collection of data take place within a theoretical framework, but it has the acknowledged purpose of allowing researchers to test the validity of that framework and to demonstrate their competence in using it to resolve problems. What count most in science are the ideas one has about available facts, and not the facts that are assembled without reference to any concept that might account for them.

Systems of scientific ideas are contextually dependent, and any attempt to telescope today's science with that of the past usually produces an anachronism or a retrospective illusion. There is a significant difference between making use of science to demonstrate the existence of God and using it to master one's environment. Every age, moreover, has its taboos: we need only recall Aristotle in exile, Giordano Bruno at the stake, Galileo on his knees, Darwin ostracized, Freud ignored, and so on. Although scientific activity continues from age to age, it cannot be said that this is a linear progression or that no loss of information occurs. And what creates the illusion (not the illusion of knowing more in quantitative terms, but the sense of having a better understanding of things then one's predecessors) is the practice in each era of reorganizing textbooks and rewriting the history of the discipline, eliminating

what seems superfluous as well as what is irrelevant and, by completely reinterpreting the past in terms of the present, separating "outdated science" from "approved science."[17]

Science is not a unidirectional learning activity that permits no glancing back.[18] It is an arborescent organism, with some infertile branches and others that continue to bear fruit. No one can be assured that any particular branch will not in the long run prove unproductive. When this occurs, a painful reappraisal may be necessary, such as the break between Priestley's phlogiston and Lavoisier's oxygen, the radical change of perspective in evolutionary theory from Lamarckism to Darwinism, the quantum leap from $F = MA$ to $e = mc^2$.

Pedagogic Eradication

Einstein said that attempting to explain the universe is like trying to explain the operation of a watch without ever being able to open it; one can hear the tick and see the movement of the second hand, but one can only imagine the mechanism that produces them. No one can say whether the conceptual model of the mechanism and the actual mechanism in the case are identical. This does not mean that there is no relation between constructed models and reality, but it indicates one of the limitations of human understanding. Scientific progress is not the revelation of reality or an asymptotic approach to truth, but rather the building of models and theories that represent increasingly compelling explanations in that they make possible better predictions and, perhaps more importantly, give rise to more questions. It is in this vein that Gaston Bachelard writes:

> It is precisely this problematic approach that marks the true scientific mind. To a scientific mind, all knowledge is an answer to a question. If there has been no question, there can be no scientific knowledge. Nothing is self-evident. Nothing is given. Everything is constructed.

Unfortunately, there is little of this attitude to scientific progress in our teaching, because courses and programs are more often than not ready-made answers to questions that students do not even ask. To enable the student to

understand and experience the unending process of the development of knowledge is one of the greatest challenges in science teaching.

Activity 7: Developing a Model

Although this is somewhat unorthodox, it might be interesting to begin the year by building the model of the kinetic theory of gases. In a short book entitled La Physique par la redécouverte dirigée,[20] Trempe and Désautels present a 16-page comic strip that deals with this subject and is developed as follows.

The strip has two stories, one a detective mystery and the other a scientific mystery. The two characters in each story attempt to describe a phenomenon, to determine its cause and to arrive at a general explanation. At each stage in their endeavour and for the three levels of explanation, they formulate an initial hypothesis, which proves incorrect, then a second, which more adequately explains the phenomenon they are studying. For example, in the first part, one of the characters, trying to discover the meaning of the letters 3D - 4K, assumes that they refer to three four-carat diamonds, although this explanation turns out to be incorrect. In the second part, in explaining the behaviour of gases, the propose a model of "particles that stretch," which would account for certain behavioural characteristics, but not for others. It is only later that the kinetic theory is proposed as an explanation of the overall behaviour.

Despite the unscholarly format, this comic strip can be used to illustrate the conjectural nature of hypotheses and the evolutionary character of explanations. Throughout their work, students must carry out experiments in order to pursue their reading. Inasmuch as this exercise is accompanied by an epistemological questionnaire, it can demonstrate the manner in which explanations are developed and the criteria by which various models are judged.

Activity 8: Becoming Aware of Progress

It is common practice in many chemistry and physics courses to study the atom by tracing the historical development of the various explanatory models. Teachers are often asked by their students if they are eventually going to be

shown the "real" model. (It must be remembered that these students have 9 or 10 years' school experience and have learned that there was one truth.) The development of the concept of the atom is explained from Dalton to Rutherford to Bohr. This practice, although interesting in itself, misses the point if it is not accompanied by an epistemological discussion. Is Rutherford's model truer or less true that Bohr's? What criteria were used in choosing one model over the other? Questions of this kind can stimulate a discussion that will make students aware of the problems we have raised.

The evolution of models and theories about light could also be an interesting theme. Two sources are particularly relevant to our purpose. First, there is the second volume of the PSSC, which deals successively with various models, from light rays to particles to waves. The epistemological discussion, however, is less than satisfactory, and in this respect, Finegold's work[21] appears to us to be superior. Both rightly emphasize, however, the development of scientific models.

VIII. THE EPISTEMOLOGICAL REVITALIZATION OF SCIENCE TEACHING

The innovative nature of the project we are proposing immediately raises questions about its feasibility and purpose. Can young high school students really think seriously about the nature of scientific knowledge, and if so, under what conditions? Why should students take time for such reflection, and to what extent will this change the teaching of science?

The Thought-Provoking Question

The first question is whether it is possible for young teenagers to change the epistemological premises that govern their view of the world. To answer this question and to formulate the conditions necessary for such change, it is necessary to turn to cognitive psychology and science history.

According to the model of cognitive function developed by Jean Piaget,[22] the starting point of learning is a state of cognitive disequilibrium created by an interaction between the learner and the matter to be learned. This disequilibrium arises from the difference between the expectations and beliefs of the learner and the information received. In this connection, the status of scientific knowledge has never been a cause of cognitive disequilibrium for students - it is obvious to them that they see things as they exist in reality. From an educational point of view, therefore, teaching situations will have to be devised to induce in the students the state of cognitive disequilibrium associated with this particular problem. But is merely asking the question enough to stimulate an effort to learn?

It seems not, if we refer to the history of science. History shows, in fact, the adoption of a new paradigm does not occur automatically whenever there is an anomaly (cognitive disequilibrium) that cannot be explained within the framework of an existing paradigm; this is brilliantly demonstrated by Thomas Kuhn in his essay on the evolution of science. Not until a series of anomalies had developed, for example, was the phlogiston theory abandoned in favour of a theory more consistent with the facts.

Not only does the scientific community not discard a paradigm easily, but the adoption of a new paradigm is not, strictly speaking, a completely logical process, because it entails the abandonment of strongly held metaphysical and epistemological beliefs by scholars working within the framework of the earlier paradigm. The case of Louis Agassiz, which has been analyzed by Pierre Thuillier,[23] is a striking example of this phenomenon. Agassiz was a respected scientist and author of a number of recognized scientific treatises, but because of his religious convictions, he could not relinquish his creationist view of species and accept Darwin's evolutionist hypothesis. Similarly, teenaged students will not change their unconscious epistemological premises (view of the world) merely on the strength of what a teacher says or when confronted with a few minor contradictions, because these premises, erroneous though they may be, enable them to function from day to day and to maintain their equilibrium in a constantly changing environment. The development from the sensualist view of the world associated with naive realism to a more rational and interactional view demands more than the mere learning of a new concept; it involves a change in the individual's conceptual structure.

This is clearly a difficult undertaking, and neither the students nor their teachers will become epistemologists overnight. For this reason, we feel that the following teaching principles must constantly be borne in mind:

1) Conceptual change within the student cannot occur unless a state of relevant cognitive disequilibrium is induced.
2) Cognitive disequilibrium is only effective when it has some significance for the student, that is to say, when the difference between expectations

and the information obtained in interaction is associated with strongly held beliefs.

3) A significant change in the epistemological premises associated with the student's view of the world can only take place over the long term.
4) A significant change in the epistemological premises associated with the student's view of the world can only take place if there is a realization of these premises and some subsequent epistemological reflection.
5) A significant change in the epistemological premises associated with the student's view of the world can only take place if the student eventually reaches the recognized operational level.

This is undoubtedly a program that will extend over all the years of high school. As we have attempted to show, however, it is vital to the reform of science teaching.

Scientific Thinking in the School

We elected at the outset to reverse the usual question of the place of science in the school; instead, we have studied the function of science teaching in the overall context of scientific activity, and have pointed out a role unconsciously assumed by high school science teachers. We stress that a concept of science is transmitted to students at this basic level, as well as a prescribed amount of theoretical knowledge. Never has this dimension of science teaching been taken into account or subjected to critical examination.

Our examination has touched upon only five of the main constituents of the concept conveyed by science teaching at the high school level. The myth of scientism in fact goes far beyond our description of it, and in this regard, our investigation is merely a beginning. In criticizing this myth, we were motivated by the belief that there is something narrow and illusory in a concept of science that shackles the development of enlightened minds for today's society and that of the future. To train young minds within the scientistic view of the legitimacy and value of science, is to prevent them from appreciating the limited validity of scientific activity and encourage them in the vain belief that science faithfully transcribes the messages dictated by nature and that in due course mankind will have acquired all knowledge and with it absolute mastery of reality. As a result, the truly reli-

able aspect of scientific activity is passed over in silence, and the young mind that is being initiated into this activity becomes imbued with a false idea of science. The myth of scientism, because of its pervasiveness in the teaching of science at the high school level, engenders an almost idolatrous attitude, which in a sense is the very opposite of the scientific approach.

The core of our argument is that the myth of scientism can only be eradicated by the adoption of an epistemologically analytical approach and that high school teachers must radically alter their teaching methods if they are to include this new objective. If the concept of science conveyed in the school is a mythical one, the conceptual means of penetrating the myth must be provided. Far from presenting epistemology as a new concept of science, we are proposing that it be used to redress the alienation of scientific intelligence. Science teaching that helps to open the young mind to the limits of validity in scientific practice acts as a safeguard against the dogmatic attitude that gradually takes hold, as is the case at present, when the critical faculty is lost. Dogmatic reliance on science leads to elitism, to an excessively technocratic philosophy, to authoritarian and antidemocratic behaviour, attributes that in turn provoke indifference and even disenchantment.

We firmly believe that the situation would be quite different if the inherent uncertainty of scientific practice were not masked. The scientific mind will not have full scope for development in the school until it has become unceasingly self-critical.

NOTES

1. Our comment is derived directly from the writings of Ernst Cassirer, in particular his Philosophie des formes symboliques, the third volume of which is devoted to a study of the symbolic formation of scientific thought (Paris: Éditions de Minuit, 1972), 3 vols.

2. Cf. Jacques Désautels, École + Science = Échec, (Québec: Québec Science Education, 1980), 109.

3. Cf. Fritjof Capra, The Tao of Physics, (London: Fontana Collins, 1975), 27-8.

4. Cf. John R. Hale, The Age of Exploration, (Alexandria, Va.: Time-Life Collection, 1966).

5. Cf. Gaston Bachelard, La Formation de l'esprit scientifique (Paris: Librairie Philosophique Vrin, 1938, 9th ed, 1978).

6. Readers interested in this subject will find the following a useful reference: Rosalind Driver and Jack Easley, "Pupils and Paradigms: a Review of Literature Related to Concept Development in Adolescent Science Students," Studies in Science Education, 5(1978): 61-84.

7. Cf. Histoire de la science, under the direction of Maurice Daumas, (Paris: Gallimard, Encyclopédie de la Pléiade, 1957), 5: 918.

8. Cf. W. Welch, L. Klopfes, G. Aikenhead, J. Robinson, "The Role of Inquiry in Science Education. Analysis and Recommendations," Science Education 65(1981): 33-50.

9. We should point out that the idea of this new black box was developed as a result of discussions with Prof. Jean Dionne of the Department of Teacher Education (Faculty of Education), Laval University.

10. Cf. Désautels, op. cit, 87.

11. Thomas L. Russell, "What History of Science, How Much, and Why?" Science Education, 65(1981): 51-65.

12. Thomas S. Kuhn, The Essential Tension (Chicago: The University of Chicago Press, 1977), 110-112.

13. Christian Laville, "Les historiens canadiens," Cahiers de Clio, 66(1981): 11.

14. Pierre Thuillier, Darwin & Co, (Brussels: Éditions Complexe, 1982), 15.

15. Harvey Siegel, "On the Distortion of the History of Science." Science Education, 63(1979): 111-118.

16. Cf. Laville, op. cit., 7.

17. Gaston Bachelard's terms.

18. The most celebrated turning back was perhaps the revival, with Copernicus, of the heliocentric theory proposed by Aristarchus of Samos (c.310-230 BC), cf. T.S. Kuhn, The Copernican Revolution (New York: Vintage Books, 1959).

19. Bachelard, op. cit., 14.

20. J. Désautels et P.L. Trempe, La Physique par la redécouverte dirigée (Montreal: Y. Bordas Dunod, 1972).

21. M. Finegold, From Visual Rays to Particles, (Toronto: Ontario Institute for Studies in Education, 1976).

22. Jean Piaget, Six études de psychologie (Paris: Éditions Gonthier, 1964).

23. Cf. Thuillier, op. cit., chap. 3.

BIBLIOGRAPHICAL REFERENCES

The titles listed below are provided merely by way of background to the problem discussed in this paper, and as a possible guide to the reader who may wish to pursue the subject further.

Bachelard, Gaston (1938) — La formation de l'esprit scientifique: contribution à une psychanalyse de la connaissance objective. Paris: Éditions Vrin (9th ed. 1978).

Bachelard, Gaston (1940) — La philosophie du Non. Paris: Presses Universitaires de France (5th ed, 1970).

Carnap, Rudolph (1966) — An Introduction to the Philosophy of Science. New York: Basic Books, Inc. (Paperback Edition, 1974).

Hempel, Carl G. (1966) — Philosophy of Natural Science. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall

Kuhn, Thomas S. (1957) — The Copernican Revolution. New York: Vintage Books (2nd ed, 1959).

Kuhn, Thomas S. (1962) — The Structure of Scientific Revolutions. Chicago: University of Chicago Press (2nd ed, 1970).

Piaget, Jean (1964) — Six études de psychologie. Paris: Gonthier.

Thuillier, Pierre (1981) — Darwin & Co. Brussels: Éditions Complexe.

Toulmin, Stephen (1961) — Foresight and Understanding. Bloomington: Indiana University Press.

Watson, James D. (1968) — The Double Helix: A Personal Account of the Discovery of the Structure of DNA. New York: Atheneum.

PUBLICATIONS OF THE SCIENCE AND EDUCATION COMMITTEE

Reports

Science for Every Student: Educating Canadians for Tomorrow's World
Report 36 (April 1984

Background Studies

Science Education in Canadian Schools: Introduction and Curriculum Analyses
Background Study 52, Volume I, by Graham W.F. Orpwood and Jean-Pascal Souque (April 1984)

Science Education in Canadian Schools: Statistical Database for Canadian Science Education
Background Study 52, Volume II, by Graham W.F. Orpwood and Isme Alam (April 1984)

Science Education in Canadian Schools: Case Studies of Science Teaching
Background Study 52, Volume III, by John Olson and Thomas Russell (April 1984)

Discussion Papers

A Canadian Context for Science Education
by James E. Page (October 1979)

Science in Social Issues: Implications for Teaching
by Glen A. Aikenhead (December 1980)

An Engineer's View of Science Education
by Donald A. George (July 1981)

What is Scientific Thinking?
by Hugh Munby (March 1982)

Macroscole: A Holistic Approach to Science Teaching
by Marcel Risi (October 1982)

Scientific Literacy: Towards Balance in Setting Goals for School Science Programs
by Douglas A. Roberts (April 1983)

Epistemology and the Teaching of Science
Robert Nadeau and Jacques Désautels (April 1984)

Proceedings

Québec Science Education: Which Directions?
(October 1981)

Who Turns the Wheel?
(January 1982)

Other Publications

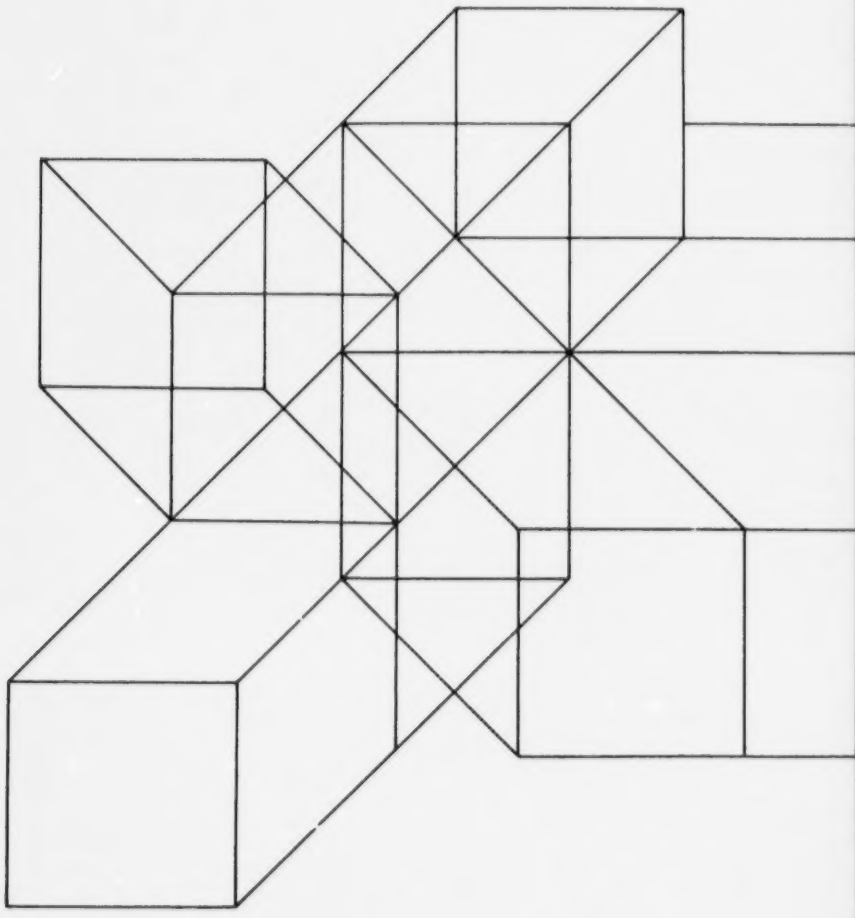
Bulletin of the Science Education Study
(nos. 1-5)

The Science Education of Women in Canada: A Statement of Concern
(January 1982)

Conseil des sciences du Canada
Science Council of Canada

Epistémologie et didactique des sciences

Exposé à débattre
par Robert Nadeau
et Jacques Désautels



Expose a debattre D84/2

ÉPISTÉMOLOGIE
ET
DIDACTIQUE DES SCIENCES

Exposé à débattre de
Robert Nadeau et
Jacques Désautels

Avril 1984

Les exposés à débattre sont des documents de travail que le Conseil des sciences du Canada met à la disposition des personnes ou groupes intéressés, en quantité limitée, pour connaître leurs réactions.

Les vues exprimées dans le présent exposé sont celles de l'auteur; elles ne reflètent pas nécessairement l'opinion du Conseil des sciences du Canada.

Vous pouvez vous procurer gratuitement des exemplaires de :

ÉPISTÉMOLOGIE ET DIDACTIQUE DES SCIENCES

auprès du :

Service des publications
Conseil des sciences du Canada
100, rue Metcalfe
Ottawa, Ont.
K1P 5M1

Copies of *Epistemology and the Teaching of Science* are also available free of charge.

© Ministre d'Approvisionnements et Services Canada, 1984

N° de catalogue SS21-4/1984-6F
ISBN 0-662-92627-7

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos 5

I. INTRODUCTION 7

II. PERSPECTIVE : LA PLACE DE L'ÉCOLE DANS LE SYSTÈME DE LA SCIENCE 10

L'acquis kuhnien 10
Le mythe du scientisme 14
Le dérangement épistémologique 16

III. LE RÉALISME NAÏF 19

Que la connaissance scientifique soit le reflet des choses telles qu'elles sont réellement 19
Neutralisation pédagogique 20
Activité 1 : La carte et le territoire 22
Activité 2 : Le voyage de Christophe Colomb 23

IV. L'EMPIRISME BÉAT 25

Que la connaissance scientifique dérive directement de la seule observation des faits 25
Atténuation pédagogique 27
Activité 3 : J'écoute, je sens, je touche et je regarde avec mes idées! 28

V. LE VÉRIFICATIONNISME CRÉDULE 32

Que l'expérimentation permette la vérification définitive des hypothèses avancées 32
Élimination pédagogique 34
Activité 4 : Une "boîte noire" nouveau style 37

VI. L'IDÉALISME AVEUGLE 42

Que le scientifique soit un être objectif parfaitement désintéressé 42
Dénonciation pédagogique 44
Activité 5 : Watson et Crick 49
Activité 6 : Darwin et Cie 50

VII. LE RATIONALISME ABUSIF 53

Que la science nous rapproche graduellement de la vérité 53
Éradication pédagogique 55
Activité 7 : Faire évoluer un modèle 56
Activité 8 : Prendre conscience du progrès 57

VIII. LE RESSOURCEMENT ÉPISTÉMOLOGIQUE DE L'ENSEIGNEMENT DES SCIENCES 59

S'interroger pour penser 59
Penser scientifiquement à l'école 61

Notes 64

Bibliographie 66

Publications du Comité de l'enseignement des sciences 68

AVANT-PROPOS

Le présent document constitue le septième exposé à débattre d'une série rédigée pour les besoins de l'étude sur l'enseignement des sciences au Canada réalisée sous les auspices du Conseil des sciences et sous la supervision de son Comité de l'enseignement des sciences. Cette étude, entreprise au printemps de 1980, vise trois grands objectifs :

- établir une base de données concernant les objectifs actuels et les caractéristiques générales de l'enseignement des sciences dans les établissements canadiens;
- faire une analyse historique de l'enseignement des sciences au pays;
- encourager le débat concernant l'orientation à donner à cet enseignement.

Afin de réaliser le troisième objectif, le Conseil a demandé l'opinion de divers experts. Il espère que ces vues, présentées dans des exposés à débattre et diffusées le plus largement possible, inciteront les professeurs de sciences et autres responsables de la formation scientifique à réconsidérer leurs objectifs et leurs méthodes.

Chacun des cinq derniers exposés précédemment publiés dans cette série a envisagé un aspect de la "personne instruite" et, dans ce cadre, a décrit les objectifs que l'enseignement des sciences devrait s'efforcer d'atteindre. En citant les lacunes qu'ils avaient observées, les auteurs on critiqué les lignes de pensée et les méthodes actuelles de l'enseignement des sciences. Un sixième demande comment remédier à ces lacunes dans le cadre réel d'un programme d'enseignement des sciences. James E. Page a mis en relief l'absence de contexte canadien de cet enseignement; Glen Aikenhead a souligné que les sciences

devraient être enseignées de façon à montrer leur pertinence à l'égard des questions sociales; Donald A. George a souligné le manque d'attention accordée aux compétences techniques de l'ingénieur; Hugh Munby a mis en évidence la dépendance intellectuelle de l'élève à l'égard du professeur et du manuel; et Marcel Risi a mis l'accent sur la nécessité d'enseigner les sciences autrement que comme s'il s'agissait simplement d'une accumulation de connaissances. Enfin, Douglas A. Roberts a envisagé le concept de culture scientifique comme une répartition équilibrée des efforts entre des objectifs divers et opposés d'enseignement des sciences et d'acquisition de la formation scientifique.

L'analyse que font Robert Nadeau et Jacques Désautels complète les précédentes en identifiant cinq croyances largement partagées, selon eux, par le monde de l'enseignement des sciences, et qui contribuent à véhiculer une image déformée de l'activité scientifique. Ils essayent d'élucider la nature de ces croyances afin de provoquer chez les enseignants et leurs élèves, une réflexion sur leur propre mode de pensée.

Il convient de souligner que les vues exprimées dans le présent exposé sont celles des auteurs, et qu'elles ne correspondent pas forcément à celles du Conseil des sciences ou du Comité de l'enseignement des sciences. Le Conseil estime toutefois que les auteurs ont présenté une thèse bien étayée, et que sa diffusion contribuera aux progrès de l'enseignement des sciences au Canada.

James M. Gilmour
Directeur de la recherche
Conseil des sciences du Canada

I. INTRODUCTION

Le titre même de ce document peut paraître rebutant pour un grand nombre d'enseignants qui, règle générale et dans une certaine mesure avec raison, ont des préoccupations qui sont davantage au ras du sol. Comment enseigner le concept de force, d'équilibre chimique ou d'homéostasie aux étudiants du secondaire, que j'aurai à rencontrer demain dans ma classe? Comment faire pour les intéresser aux problèmes posés en physique, en chimie, en biologie? Quelle méthode utiliser pour qu'ils profitent vraiment des séances de laboratoire? Ce sont là des questions fort pertinentes pour ceux qui doivent quotidiennement enseigner les sciences. Nier l'importance de ces questions c'est faire preuve d'irréalisme, d'un manque de sensibilité à l'égard de ceux qui jour après jour se chargent de l'une des tâches les plus délicates qui soient : la formation de ceux qui en l'an 2000 assumeront la direction de notre société.

Mais c'est précisément parce que l'éducation de ces jeunes est importante que nous proposons aux enseignants une réflexion qui sorte de l'ordinaire. Une réflexion qui, bien qu'elle laisse momentanément de côté les problèmes trop quotidiens et tente de mettre en lumière des aspects de l'apprentissage des sciences qui passent souvent inaperçus, se veut avant tout source d'interrogation, source de renouvellement. L'arbre comme on le sait masque souvent la forêt et il est difficile pour ceux qui sont au coeur de l'action de prendre le recul nécessaire pour percevoir la direction de celle-ci. Nous proposons donc des pistes de réflexion tout en étant parfaitement conscients que seuls les enseignants ont le pouvoir d'amorcer et de mener à bien un projet d'éducation scientifique renouvelé.

Les études portant sur l'état de l'enseignement des sciences se sont faites nombreuses au cours des dernières années. Elles nous révèlent que l'enseignement des sciences n'a pas atteint les objectifs qu'il s'était proposés il y a une vingtaine d'années, au moment où s'est amorcé sous l'influence américaine le plus formidable des renouvellements qu'ait connu cet enseignement. L'accord sur ce que l'on peut désormais appeler un échec est presque unanime. Mais si les élèves n'ont pas assimilé la démarche expérimentale, l'attitude scientifique et les concepts intégrateurs de la science, qu'ont-ils donc acquis?

L'hypothèse qui est la nôtre est la suivante :

> En écartant de ses préoccupations une véritable réflexion sur la nature du savoir scientifique, sur les conditions de sa création, l'enseignement des sciences contribue au renforcement de croyances, de mythes, qui font partie de l'idéologie scientiste.

Le titre de notre essai, que nous avons nous-mêmes qualifié de rebutant, commence dès lors à prendre signification. Ce que nous affirmons c'est que l'individu qui ne s'est pas penché sur les conditions qui rendent possible le savoir scientifique (épistémologie), ne peut acquérir une véritable culture scientifique et versera donc dans des croyances, des mythes relatifs à cette forme de savoir (scientisme). Quelle est donc la nature de ces croyances associées à l'idéologie scientiste que Pierre Thuillier définit comme "une croyance quasi aveugle en la valeur cognitive et morale de la science", telle est la première question à laquelle nous tenterons de répondre. Mais également, quels moyens pouvons-nous mettre en oeuvre pour provoquer chez les élèves du niveau secondaire une réflexion d'ordre épistémologique, une réflexion sur leur propre mode de pensée?

À l'une et l'autre question nous ne répondrons que très partiellement. En effet, cet essai n'est pas équivalent à un cours d'épistémologie des sciences et ne pourra conséquemment toucher que quelques aspects de ce vaste champ de connaissance. D'autre part nous ne pourrons décrire en toutes ses dimensions l'idéologie scientiste et nos suggestions pédagogiques sont autant d'hypothèses à explorer. Le but visé est bel et bien de provoquer une discussion à partir

d'un point de vue particulier sur l'enseignement des sciences. Nous inscrivons donc notre projet dans un volet crucial de l'étude du Conseil des sciences du Canada sur l'enseignement des sciences. Car ce n'est pas tout de connaître l'état de cet enseignement, il nous faut immédiatement poser la question sur son orientation future.

II. PERSPECTIVE : LA PLACE DE L'ÉCOLE DANS LE SYSTÈME DE LA SCIENCE

L'acquis kuhnien

En 1962 paraissait aux États-Unis un ouvrage qui allait en peu de temps bouleverser la philosophie traditionnelle des sciences. S'inspirant davantage d'une approche historique de l'activité scientifique, La Structure des révolutions scientifiques de Thomas S. Kuhn substituait à l'analyse logique et méthodologique qui avait été jusque-là le lot habituel des épistémologues, une problématique tout entière inspirée par des préoccupations nettement plus sociologiques. Au lieu de s'aventurer à proposer un système normatif de conventions et de règles au terme desquelles la science authentique aurait pu être démarquée d'entreprises pseudo-scientifiques, Kuhn attirait plutôt l'attention sur le fonctionnement propre des communautés scientifiques. L'activité scientifique était décrite, au moins pour le cas des sciences les plus avancées comme la physique, la chimie, la biologie -- mais non pour les sciences sociales, les études humaines ou la philosophie elle-même -- comme une dynamique suivant un modèle de développement spécifique marqué au départ par l'acquisition d'un premier "paradigme", c'est-à-dire par la reconnaissance par un groupe d'un exploit scientifique tout à fait particulier ouvrant de nouvelles perspectives de recherche et imposant, par le fait même, tout un ensemble de valeurs aussi bien d'ordre méthodologique que d'ordre métaphysique et moral. Kuhn décrivait donc la constitution de traditions de recherche donnant lieu à une pratique de "science normale" fondée sur la résolution de problèmes bien circonscrits, et donnant irrémédiablement lieu, à plus ou moins long terme, à cause d'anomalies insurmontables à l'intérieur de la tradition de recherche dominante, à une crise à l'issue de laquelle devait s'imposer un tout nouveau paradigme. Ainsi était conçu le schéma des révolutions scientifiques :

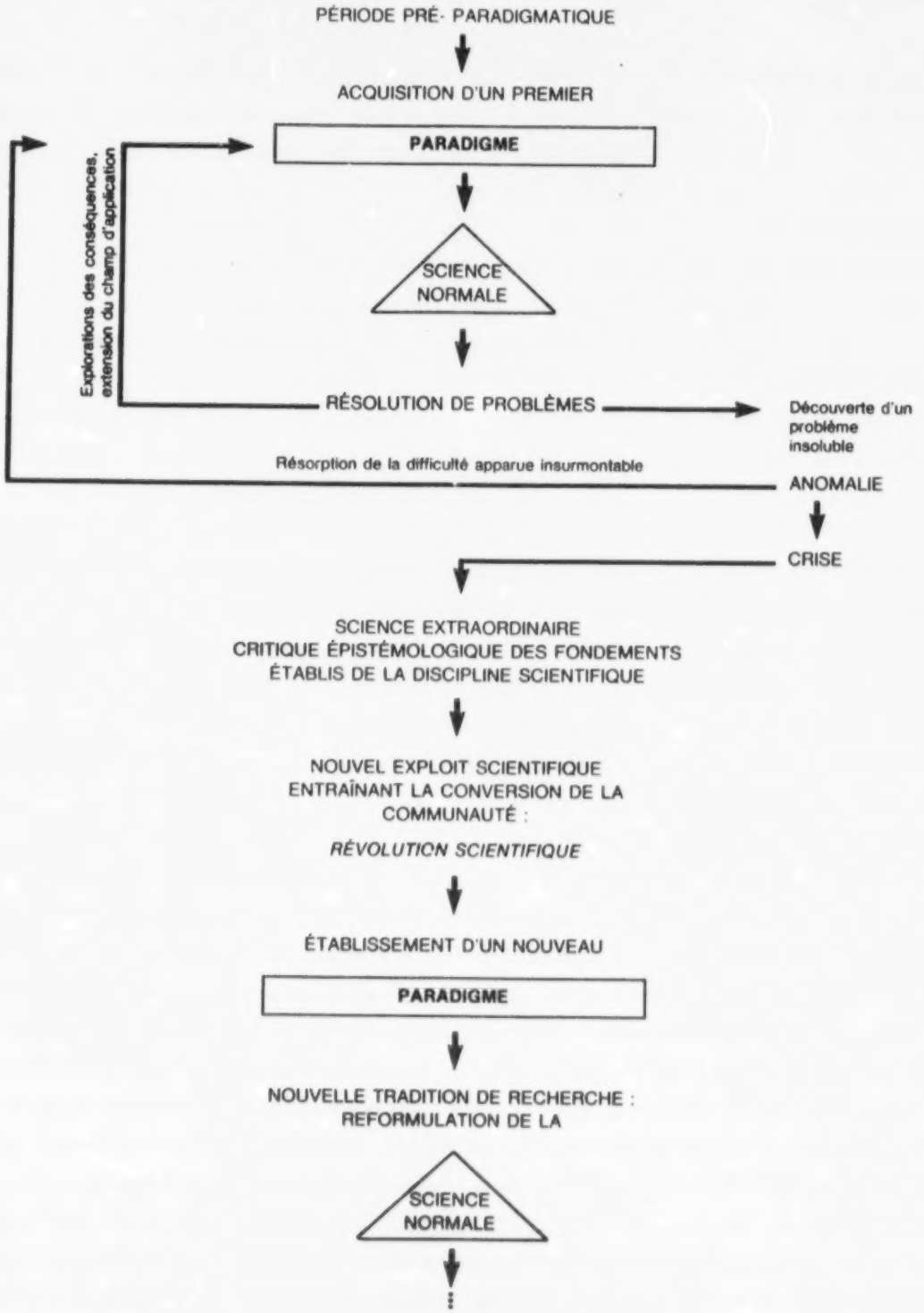


Figure 1 : Schéma du développement des sciences selon T.S. Kuhn

Kuhn prenait pour acquis, comme en fait tous les philosophes des sciences depuis Kant, que la science était d'emblée une réussite spectaculaire. Mais pour lui, il ne convenait pas tant d'en fixer les limites de validité, comme pour redorer le blason de la spéculation philosophique, ni d'élaborer un système de règles méthodologiques fixant d'autorité le statut de toute pensée voulant à l'avenir se présenter comme scientifique. Pour Kuhn au contraire, l'activité scientifique incorporait bon gré mal gré tout un ensemble de présupposés métaphysiques inextricablement liés aux conceptions scientifiques plus confortablement assises sur l'observation et l'expérimentation : il ne pouvait donc pas être question d'exiger que la science se départisse d'une partie d'elle-même, comme si de telles croyances "irrationnelles" ne constituaient qu'un corps étranger subrepticement introduit dans l'organisme, parfaitement rationnel lui, de la pensée scientifique. Et pour Kuhn également, il était inutile de chercher à formuler un ensemble de règles méthodologiques valables en tout temps et pour toujours puisque l'étude de la dynamique des révolutions scientifiques enseignait que ces règles ou bien n'existaient pas et n'étaient pas nécessaires, ou bien encore qu'elles faisaient l'objet de spécifications à l'intérieur des diverses communautés de chercheurs et qu'elles étaient dès lors susceptibles de transformation inéluctable tout comme ces communautés elles-mêmes.

Mais ce que l'ouvrage de Kuhn mettait surtout en lumière, c'est le mécanisme par lequel ces communautés justement se formaient et se déformaient dans le temps comme autant de "collèges invisibles" assurant aussi bien la transmission des résultats obtenus que la reconnaissance par les pairs de la valeur des recherches d'un individu donné ou d'une équipe : Kuhn mettait ainsi en évidence le fait que si d'une part ce qui assurait la cohésion du groupe pouvait être décrit comme le partage des retombées d'une réalisation scientifique particulièrement impressionnante et prometteuse, ce qui d'autre part assurait pour un temps le maintien du groupe, était lié à son expansion possible, et donc à son pouvoir d'attraction sur les jeunes esprits. C'est par l'école, en quelque sorte, de façon plus directe par les divers programmes de formation dans les universités, et, primordialement, par l'intermédiaire des manuels disciplinaires, que les communautés de scientifiques parvenaient à

conserver leur ascendant sur leurs rivales possibles et à faire dominer le plus longtemps possible leur façon de faire et leur façon de voir. Ces manuels, ainsi que Kuhn nous le faisait découvrir, occultaient l'histoire passée de la discipline en n'en retenant plus qu'un tracé rectiligne menant directement à la théorie du jour. Ils stipulaient l'ensemble des questions pertinentes offertes à la recherche parmi lesquelles celles qui avaient trouvé réponse fixaient la gamme des standards d'excellence acceptés. Ils véhiculaient enfin, plus ou moins consciemment, les valeurs propres aux groupes en place, qu'il s'agisse à proprement parler de valeurs d'ordre cognitif comme le degré de précision dans la mesure ou l'exactitude dans le calcul, ou encore de valeurs d'ordre éthique et politique comme le respect absolu de la vie ou la propriété privée des moyens de production.

Si Kuhn est fondé à croire que la science est une pratique collective dont le statut social est essentiellement assuré en permanence par un jeu de relations impliquant d'un côté ceux qui savent déjà et de l'autre ceux qui ne savent pas encore, alors le processus qu'il faut analyser est bien celui qui prend définitivement forme à l'université parce qu'il s'y termine, à savoir celui de la "formation des esprits scientifiques", pour parodier un titre de Gaston Bachelard. Mais il importe de voir alors que ce processus commence bien avant l'université, qu'en fait il débute avec l'école elle-même, dès le primaire, et qu'il s'accélère avec le passage aux études secondaires. Ainsi, ce qui est donné aux élèves dans le cours de biologie, de chimie et de physique (mais aussi dans les cours de géographie, d'histoire, de mathématiques et, le cas échéant, dans les cours de sciences sociales comme l'économie par exemple), ne saurait se réduire à une masse de connaissances objectives et impersonnelles qu'ils accumuleraient en mémoire pour les faire servir le moment venu. Il leur est d'abord et avant tout communiqué une certaine image de ce qu'est et de ce que prétend être la science au moment où ces élèves, garçons et filles, prennent connaissance des résultats acquis dans ces disciplines. Ainsi, les professeurs de sciences, qu'ils le veuillent ou non, qu'ils s'en rendent compte ou non, servent non seulement à transmettre tout un bagage théorique, mais également à légitimer et à valoriser l'activité scientifique elle-même. Ils se trouvent donc à transmettre une conception de la science au moment même où

ils pourraient croire qu'ils ne transmettent que des connaissances acceptées. Telle est, pour l'essentiel, l'hypothèse de travail à partir de laquelle nous allons déployer l'analyse qui va suivre.

Le mythe du scientisme

Nous pensons en effet être en mesure d'identifier, au moins sous certains de ses traits essentiels, une telle conception de la science à l'oeuvre dans l'enseignement des professeurs de sciences du niveau secondaire. Par conception de la science, nous entendons une série d'opinions plus ou moins spontanées et de croyances plus ou moins bien ancrées, formant système au point où chacune s'appuie sur les autres et la sous-tend aussi bien, et le plus souvent présentées comme allant de soi. Ces opinions et croyances concernent en propres termes l'activité ou la pratique scientifique, son sens, sa portée, sa validité du point de vue spécifiquement cognitif, ce que nous allons appeler ci-après sa légitimité, et elles concernent aussi sa finalité, son intérêt, son mérite du point de vue moral et sociopolitique, ce que nous allons dorénavant dénoter en parlant plutôt de la valeur de la science d'aujourd'hui.

Cette conception de la science, plus ou moins raisonnée chez les enseignants ou encore chez les praticiens des sciences eux-mêmes, nous allons désigner à l'aide de l'expression le scientisme. Et dans la mesure où nous pensons nous-mêmes qu'une telle conception donne une image chimérique de la pratique scientifique, nous allons la décrire comme une sorte de mythologie, c'est-à-dire comme une série articulée de représentations susceptibles d'une prise de conscience critique. Nous parlerons donc de la mythologie scientiste, une espèce de credo articulant divers articles d'une foi aveugle en l'activité de la science. La fonction première d'un tel dogme semble être de constituer, en inculquant dans l'esprit des jeunes élèves, une sorte de structure d'accueil où viennent prendre place les diverses informations scientifiques qu'il leur est demandé d'emmagasiner. De cette manière, tandis qu'ils apprennent à manipuler certains concepts théoriques ou expérimentaux, les élèves font eux-mêmes l'objet d'une manipulation : on leur façonne l'esprit scientifique non pas seulement en leur présentant certains des résultats scientifiques les moins contestables, mais surtout en surimposant sur ces résultats épars une inter-

prétation de la pratique scientifique qui en fait en quelque sorte une activité au-dessus de tout soupçon.

Le scientisme, c'est cette attitude face à la science qui y voit non seulement une activité de connaissance privilégiée, notamment à cause d'une méthode spécifique de résolution de problèmes qu'on y trouverait à l'oeuvre depuis fort longtemps et qui aurait fait ses preuves, mais encore qui en fait une activité qui n'est pas susceptible d'être mise en question sur le plan de sa portée cognitive. La science serait, dès lors, une pratique immunisée contre la critique puisque toute critique, pour être jugée scientifiquement recevable, devrait elle-même en procéder. Car seule la science pourrait nous assurer d'une conception juste de quoi que ce soit, elle serait la mise en oeuvre d'une pratique obéissant à des règles méthodiques rigoureuses assurant la conquête du vrai, elle serait la seule à pouvoir nous assurer que nos prétentions à connaître quelque chose sont fondées et, qui plus est, elle le ferait en accumulant progressivement, par l'observation et l'expérimentation, des réponses définitives aux questions que l'être humain est susceptible de se poser. Le scientisme, pour nous, c'est donc à la fois l'assignation à l'activité scientifique d'une légitimité qu'elle est la seule à posséder, et la croyance active en vertu de laquelle la science pourrait d'elle-même fournir la justification de son statut particulier sous le prétexte que toute question à son sujet ne pourrait recevoir de réponse valide que de l'intérieur même de sa démarche englobante.

Il résulte de cette attitude une surlégitimation et une survalorisation de l'activité scientifique : l'on croit que la science dit nécessairement tout ce qui est vrai, non pas parce que la démarche scientifique met de l'avant des contrôles susceptibles de nous assurer que ses assertions sont bien fondées, mais bien parce qu'aucune question digne d'intérêt pour l'esprit humain ne saurait recevoir de traitement autre que celui de la science expérimentale. Si l'idée que l'on se fait de la science est celle d'une pratique qui a authentiquement prise sur la vérité et qui est seule à pouvoir contrôler ses prétentions, la science devient une dogmatique, issue de révélations qu'auraient eues les plus éclairés d'entre nous, que les autres n'auraient qu'à croire sur

parole à moins de pouvoir refaire à leur tour la démarche menant à la seule et unique vision des choses possibles.

La mythologie scientiste ne nous berce-t-elle pas d'illusions? Les choses sont-elles précisément comme les scientifiques disent qu'elles sont? Ont-ils accès à un univers d'observations d'où ils tireraient directement, sans grand risque de se tromper, leurs conjectures et hypothèses? Sont-ils en possession, avec l'expérimentation, d'une voie royale vers la vérité et peut-on penser que le développement, accentué au cours des 50 dernières années, de la recherche scientifique produit un dévoilement progressif de la vérité, de la seule vérité, de toute la vérité? Enfin, peut-on vraiment avoir une confiance aveugle en tous ces spécialistes désintéressés, dont on dit qu'ils travaillent nécessairement pour le plus grand bien-être de l'humanité souffrante, comme s'ils allaient peu à peu nous débarrasser de toutes nos inquiétudes et régler tous nos malheurs?

Le dérangement épistémologique

En un sens, faire de l'épistémologie aujourd'hui, c'est n'en pas croire un mot. Mais revenons un instant à Kuhn.

Si Kuhn met en relief la fonction de l'enseignement dans la constitution des communautés savantes, il réduit cependant l'épistémologie à la portion congrue. La critique épistémologique n'aurait de rôle véritable à jouer, selon lui, que lors des crises importantes, lorsque les idées reçues dans un domaine de recherche dominé par un paradigme sont ébranlées sur leur base, et que la discipline concernée doit quitter ses certitudes et se faire à l'idée d'une transformation radicale. C'est pourquoi l'on trouve des réflexions épistémologiques importantes chez Ernst Mach par exemple, qui fait une critique de la notion newtonienne d'espace absolu et rend possible la révolution einsteinienne.

Si la réflexion épistémologique ne saurait avoir qu'un rôle effacé, voire épisodique dans la pratique de la science, il n'est pas évident qu'il en soit ainsi et qu'il doive nécessairement en être ainsi dans la pratique de l'ensei-

gnement des sciences. Ici, bien que notre hypothèse de départ fasse sienne l'essentiel de l'acquis kuhnien, nous allons tenter d'en radicaliser l'effet, d'en étendre la portée pratique, quitte même à dérouter ceux qui ont été les plus rapides à emboîter le pas derrière Kuhn. Car, disons-le franchement, Kuhn laisse clairement à entendre que la science est une entreprise réussie et l'on voit mal pourquoi on pourrait chercher à en modifier la pratique. Pourtant nul ne met en cause que l'enseignement des sciences fasse problème et nos considérations procèdent du même constat. À notre avis, le pas qu'il faut maintenant franchir est le suivant : *faire en sorte que l'enseignement des sciences au niveau secondaire ait pour objectif fondamental de transmettre aux élèves une conception critique de l'activité scientifique, à l'opposé de la mythologie scientiste.*

Et c'est à l'épistémologie contemporaine qu'il sera demandé de fournir les moyens conceptuels d'une telle critique, dans la mesure où l'épistémologie a pour fonction première de procéder à l'analyse des idées reçues concernant ce qui peut être considéré comme science, et dans la mesure également où elle peut contribuer à fournir à ceux qui forment les esprits scientifiques l'occasion d'une réflexion sur la valeur et la légitimité de l'image qu'ils donnent de la science. Le scientisme sera d'emblée présenté comme un système d'idées qui biaise la légitimité et la valeur authentiques de la science. S'il est vrai que la pratique des sciences, telle qu'elle se fait maintenant, est proprement indissociable de la pratique de l'enseignement des sciences, nous sommes fondés à croire qu'une réflexion épistémologique sur la science enseignée peut constituer un outil d'une extrême efficacité pour améliorer la qualité de la relation pédagogique entre le professeur de sciences et l'élève, et pour transformer graduellement la qualité des esprits que les enseignants du secondaire introduiront dans l'univers dorénavant démystifié de la science contemporaine. Parce que l'image que projettent les enseignants est la première image concrète que l'élève se fait de l'activité scientifique, il importe que les enseignants deviennent conscients qu'une représentation absolutisée de cette pratique s'est subrepticement installée dans leur esprit. Il importe aussi qu'ils puissent découvrir que cette représentation confine presque au fétichisme, qu'ils enseignent en quelque sorte la science comme la véritable

religion à laquelle il faut aujourd'hui se convertir. Il importe enfin qu'ils puissent se poser la question à savoir non seulement si la conception de la science transmise aux élèves se défend, mais encore si la mise en question de cette conception ne peut pas constituer le fil d'Ariane qui guidera l'élève hors du labyrinthe scientiste où on risque de le tenir captif toute sa vie durant.

Au terme de cette interrogation, ne se pourrait-il pas que l'on soit même amené à penser que l'épistémologie peut montrer à la didactique des sciences le chemin de sa révolution?

III. LE RÉALISME NAÏF

Que la connaissance scientifique soit le reflet des choses telles qu'elles sont réellement

L'idée la plus tenace, peut-être, et l'image la plus forte, donc aussi bien celle qui marque de la façon la plus indélébile que celle dont il ne semble pas possible de faire l'économie, c'est celle d'une donnée-déjà-là, que globalement nous identifions au monde, à l'univers ou encore à la réalité. C'est l'idée qu'avant tout travail de prise de conscience, il y a un "quelque chose" dont on prendra conscience, idée inextricablement enchevêtrée à cette autre idée que le travail de la pensée est un travail en quelque sorte passif qui consiste à restituer l'ordre des choses tel qu'il existe en lui-même. Cette position épistémologique s'appelle le réalisme naïf. Mais rien n'est, à strictement parler, donné à la pensée scientifique qui ne soit, en quelque manière, construit. C'est l'idéologie du sens commun qui veut que la science continue la conscience quotidienne du monde vécu, et qu'ainsi le langage scientifique ne soit rien d'autre que l'ensemble des spécialisations du langage ordinaire. S'il est vrai qu'en un sens tous les langages techniques mis au point par les diverses disciplines scientifiques tirent origine des langues naturelles, et que, pour pouvoir être compris, ils doivent nécessairement pouvoir s'interpréter, au moins partiellement, dans le langage naturel, cela ne veut pas dire que notre langage de tous les jours n'est pas lui-même une reconstruction symbolique de l'univers ambiant. Penser avoir accès immédiatement au réel -- alors que nous n'avons accès au réel que par la médiatisation du langage et qu'il ne saurait exister de matière pour nous qu'à travers des formes symboliques -- c'est justement croire que le monde se donne à nous tout constitué d'avance[1]. Or, autant il est faux de croire que le monde se réduit

à la représentation que j'en ai, autant il est faux de s'imaginer pouvoir connaître ce qu'il en est du monde hors de toute représentation. L'univers en soi n'est pas réductible à mon univers de discours, mais il ne m'est pas accessible sans la mise en place de langages rendant possible sa représentation. En ce sens, les limites de mon monde sont les limites des langages dont je dispose.

Il ne s'agit pas, on le voit, de soutenir que le monde est une pure construction de l'esprit humain, et que chaque individu est bien libre de procéder à la construction qui lui convient le mieux subjectivement. Car le langage, instrument de communication autant que de représentation, n'est pas un outil privé mais un processus social. L'échange de vues entre individus humains, l'intersubjectivité donc, est le fondement de l'objectivité de la pensée. Or, ce que nous sommes convenus d'appeler la science n'est rien de plus mais rien de moins que le processus par lequel nous construisons collectivement une représentation de la réalité. Comme la science se joue tout entière dans le langage, toutes les réalités qu'elle théorise sont autant d'univers de discours.

Ainsi, entre l'objet et le sujet, entre la nature et la théorie physique, entre la Société et la théorie sociologique, entre la Réalité et sa représentation intersubjective, des symbolismes s'interposent. La connaissance scientifique du monde se sert de tels symbolismes. Les symboles et les signes que nous forgeons ne reflètent pas le monde, mais, tant bien que mal, ils y réfèrent. La science n'est pas la simple copie de la réalité, ouverture neutre à ce qui se donne d'emblée, elle est activité et elle est construction.

Neutralisation pédagogique

La croyance épistémologique selon laquelle nous voyons les choses telles qu'elles sont en réalité est profondément ancrée dans notre mentalité d'occidentaux. Elle détermine dans une large mesure nos comportements, et ce, même si nous savons intellectuellement que nous construisons notre vision du monde.

La métaphore de la carte et du territoire, que nous devons à Alfred Korzybski, nous aidera à mieux saisir. Comme la chose a été précisée ailleurs :

> La carte géographique, on en convient assez facilement, n'est pas le territoire, bien qu'elle en soit une représentation très commode. Grâce à celle-ci, on peut se diriger, prévoir les obstacles qui se présentent sur le parcours, imaginer les dénivellations de terrain, identifier les agglomérations urbaines, c'est-à-dire fournir un ensemble d'informations qui peuvent être utilisées à toutes sortes de fins; autant pour préparer un plan d'attaque contre l'ennemi que pour planifier un voyage touristique. Ainsi, en utilisant des conventions, des signes, on arrive à se représenter suffisamment bien la réalité pour être capable d'une action efficace, à la condition de pouvoir interpréter ces conventions, ces symboles. La preuve en est que l'on peut montrer la carte d'un territoire à un indigène sans que celui-ci ne fasse vraisemblablement le lien entre ce qui apparaît sur la carte et le territoire qu'il connaît pourtant si bien d'une autre façon. Toutefois, aussi loin qu'on pousse le raffinement, la carte sera toujours une représentation de la réalité, ou pourra y ajouter de plus en plus de détails, mais il est des dimensions de cette réalité qui ne pourront être représentées.[2]

Somme toute, la connaissance que nous avons du territoire, tout en lui étant apparentée, n'est pas identique au territoire.

L'utilisation de conventions, de signes et de symboles dans la représentation de la réalité constitue une abstraction et, en ce sens, la carte est une connaissance abstraite du territoire et non pas une connaissance concrète et immédiate, qui correspond davantage à la connaissance qu'en possède l'habitant qui l'a parcouru en tous sens. Ce savoir abstrait et rationnel est possible grâce à l'intellect dont la fonction est de discriminer, diviser, comparer, mesurer et catégoriser, mais, comme le dit Capra :

> ...pour pouvoir comparer et classifier cette immense variété de formes, de structures et de phénomènes qui nous entourent, il ne nous est pas possible de tenir compte de tous leurs aspects, il est nécessaire de choisir ceux qui nous paraissent les plus significatifs. Alors nous construisons des cartes intellectuelles de la réalité, dans lesquelles les choses sont réduites à leur contour général. La connaissance rationnelle est conséquemment un système de concepts abstraits et de symboles, caractérisé par une structure linéaire séquentielle typique de notre façon de penser et de parler.[3]

Telle est également, en substance, la nature de la connaissance scientifique, c'est-à-dire une représentation abstraite, intellectuelle des phénomènes en vue d'en prédire le comportement. La science en tant que connaissance est donc une construction intellectuelle, et ce que l'on appelle généralement les lois de la nature n'est que le résultat de cette activité humaine. La nature comme telle n'a pas de lois, mais son comportement peut être décrit, prédit par des lois et des théories qui sont conçues par les scientifiques.

Dans le but de faire réfléchir les élèves sur la nature de leur propre démarche de connaissance nous proposons dans les quelques pages qui suivent des activités susceptibles d'alimenter cette réflexion. Ce ne sont évidemment pas les seules, et la seule limite qui nous est imposée est celle de notre propre imagination.

Activité 1 : La carte et le territoire

Nous avons utilisé la métaphore de la carte et du territoire pour illustrer la relation qui existe entre la connaissance scientifique et l'objet de connaissance. À ce stade, nous suggérons d'utiliser la même métaphore comme outil pédagogique dans le cadre de l'enseignement des sciences au niveau secondaire.

La production de la carte d'un territoire qui est connu des élèves (par exemple, le terrain de l'école, la rue, etc.) constitue donc le premier exercice que nous proposons. Il s'agit d'un exercice dont le niveau de complexité est à la mesure des élèves de cet âge, puisqu'il n'y intervient que des techniques simples de géométrie ou de triangulation. On ne devra évidemment pas s'attendre à un travail d'expert du premier coup mais gageons qu'ils sauront nous surprendre.

Dès qu'une carte est produite, une prise de conscience peut déjà s'amorcer. Les élèves arriveront en effet facilement à admettre que leurs cartes ne sont pas des photographies (modèles iconiques) de la réalité, mais des représentations symboliques fonctionnelles. Elles permettent de situer l'espace par rapport aux coordonnées nord-sud, elles peuvent permettre à des individus qui l'utilisent de s'orienter dans cet espace, de se déplacer d'un point à un

autre, de reconnaître certains éléments, etc. Ils saisiront également qu'ils ont utilisé des signes, des conventions, des symboles afin de représenter certains aspects de la réalité et, dans la mesure où ils pourront comparer leurs cartes avec celles qui ont été produites par d'autres, ils comprendront qu'il y a plus d'une carte possible. À cette étape, l'interrogation suivante peut guider une discussion fructueuse :

1) Quels ont été les critères utilisés pour choisir les éléments qui sont représentés sur la carte?
2) Y a-t-il identité entre ces éléments et ce qui apparaît sur la carte?
3) La carte rend-elle compte de la complexité de la réalité que l'on veut représenter? On peut alors suggérer de refaire une carte pour une partie du territoire et demander combien il faudrait de cartes pour épuiser la réalité.
4) La carte rend-elle compte de l'aspect dynamique (changement de la réalité) que l'on veut représenter?

Une discussion orientée vers des questions de ce genre devrait permettre aux élèves de saisir l'essentiel, à savoir :

- que la connaissance du territoire, à l'aide d'une carte, constitue l'une des représentations possibles de cette réalité;
- que les éléments représentés ont fait l'objet d'un choix qui en élimine de facto certains autres;
- que peu importe le niveau de sophistication de la carte, celle-ci demeure toujours une représentation abstraite et simplifiée de la réalité.

Activité 2 : Le voyage de Christophe Colomb

L'activité que nous proposons ci-dessous s'inscrit dans une perspective multi- ou interdisciplinaire dans la mesure où les professeurs d'histoire, de géographie et de sciences peuvent contribuer à sa mise au point et à sa réalisation.

Il est bien connu que le but poursuivi par Christophe Colomb était de découvrir une nouvelle route pour se rendre aux Indes. Afin de réaliser ce but il entreprit un voyage dont l'itinéraire a été déterminé à partir des informations qui circulaient, mais également à partir des cartes disponibles à son époque. À quoi ressemblaient donc les cartes de cette époque? Est-ce que les navigateurs pensaient vraiment qu'il s'agissait d'une représentation fidèle

du territoire? Dans quelle mesure les attentes générées par la croyance en la validité des cartes a-t-elle influencé l'interprétation des faits d'observation? (On rapporte par exemple que Christophe Colomb au moment où il débarqua en Amérique croyait vraiment être parvenu sur les côtes de Chine, et le fait d'avoir ramené de son expédition des indigènes donnait du poids à ses affirmations puisque Marco Polo en avait parlé dans ses descriptions de la Chine[4].) Comment ces cartes ont-elles évolué? Sont-elles le reflet de plus en plus parfait de la réalité ou permettent-elles plutôt de meilleures prédictions? Est-il possible de produire des cartes qui n'introduisent aucune distorsion?

Il est certain que la cartographie a fait des pas de géant depuis l'époque de Christophe Colomb, mais toujours la carte demeure une représentation du territoire faisant intervenir signes, symboles, concepts. En suivant ainsi l'évolution de la cartographie terrestre il est possible de faire prendre conscience aux élèves :

- que toute représentation ne peut rendre compte que de certains aspects de la réalité;
- que toute représentation oriente dans un sens déterminé l'action et les interprétations des phénomènes;
- que l'évolution des représentations constitue un progrès dans le sens d'une meilleure prédiction des événements sans que pour autant cette évolution soit linéraire, sans revirements;
- que même si l'on multiplie le nombre de représentations, la réalité ne pourra être épuisée.

IV. L'EMPIRISME BÉAT

Que la connaissance scientifique dérive directement de la seule observation des faits

Avec la constitution de la science moderne aux XVI^{e} et XVII^{e} siècles, l'humanité occidentale a cru mettre la main sur la méthode scientifique par excellence. Cette méthode consisterait au départ à observer les faits eux-mêmes, quels qu'ils soient, pour en induire, ensuite, par généralisation, l'hypothèse explicative. Dans cette perspective, la science aurait non seulement un commencement psychologique absolu, soit l'observation, mais également un fondement logique définitif puisque toutes les affirmations que l'on retrouverait dans la bouche des savants bénéficieraient d'un soutien inductif irrévocable. Caractériser la science comme étant fondamentalement une activité de cueillette minutieuse, ordonnée, voire même exhaustive des faits, c'est faire place à l'empirisme béat.

Mais qu'est-ce donc qu'un fait et avec quel langage les faits nous parlent-ils? Si un fait n'est établi que par et pour un observateur quelconque, reconnaissons d'emblée qu'un fait pur et simple, au sens usuel de l'expression, n'est qu'illusion. Un fait scientifique ne peut être dit établi qu'au terme d'une explication qui rende compte de son apparition : l'établissement de tout fait nécessite donc, au sein de la communauté scientifique qui voudra le considérer, toute une procédure sans laquelle aucun consensus ne saurait être atteint. Le plus souvent, un consensus sur un fait donné présuppose tout un ensemble de consensus préalables sur les théories à l'aide desquelles les observations et les mesures diverses seront opérées, de même qu'un consensus provisoire sur un certain nombre d'hypothèses que l'on tiendra pour fondées au

moment où l'on prétendra établir scientifiquement le fait qu'il était question de décrire et d'expliquer.

Contre l'empirisme béat, qui voit l'esprit humain comme une table rase où viennent se disposer un à un les objets de la connaissance, et donc qui nous incite à considérer l'esprit du jeune élève comme une cire vierge où viendront s'imprégner les formes réelles des phénomènes constituant l'univers physique, il faut au contraire soutenir que les élèves sont déjà dans un univers de connaissances quand ils accèdent au niveau secondaire, peu importe ce que valent ces connaissances; et à supposer qu'elles n'aient aucune légitimité scientifique, on aurait encore davantage de raisons de s'en préoccuper pour en venir à bout. Il vaut mieux penser, en fait, qu'à quelque stade de développement intellectuel que l'on soit rendu, nous sommes toujours dans du déjà connu, et que là s'entremêlent, avec une cohésion qui n'est pas toujours apparente mais qui n'en existe pas moins, préjugés et illusions d'un côté, informations fondées et jugements adéquats de l'autre.

Il faut soutenir également que "les faits" ne constituent aucunement le point de départ de l'investigation scientifique : sans un point de vue préalablement adopté, sans une perspective de recherche suffisamment explicite, l'observation ne peut avoir lieu car l'enquête ne peut démarrer. Le point de vue lui-même tire origine d'une question ou d'une série de questions que l'on se pose d'emblée et auxquelles on entend prendre le temps qu'il faut et les moyens jugés nécessaires pour y répondre. Sans un problème donné à l'intelligence, il n'est pas de solution qui puisse s'envisager. L'idée que l'activité scientifique commence avec les faits eux-mêmes et que la pratique de l'observation, au sens technique du mot, ne nécessite rien de plus que l'attention du regard et l'ouverture de l'esprit, n'est qu'un mirage épistémologique.

Si le jeu de la science est constitué d'une interminable série de questions et de réponses, il faut convenir également qu'à toute question est le plus souvent associée l'anticipation d'une réponse. Justement, la pratique de l'observation est fertile dans l'optique de la confrontation de la réponse anticipée avec l'information recueillie. Dans le meilleur des cas, un tel

processus heuristique aura pour résultante la mise en place d'une hypothèse ou d'un réseau de conjectures que l'on voudra tester par la suite.

Atténuation pédagogique

Pour le sens commun, observer c'est regarder attentivement en notant le plus grand nombre de détails possibles. Dans la mesure où cette définition correspond à celle de la majorité des étudiants-maîtres en sciences, on ne devrait pas être étonné qu'il en soit de même pour les jeunes adolescents.

Outre le fait que ces derniers soient inconsciemment influencés par la culture ambiante de leurs milieux respectifs, l'école primaire qu'ils fréquentent véhicule, règle générale, le schème épistémologique de l'empirisme béat, ce qui ne fait que renforcer leur croyance selon laquelle nous voyons les choses telles qu'elles sont en réalité. Qu'il suffise alors de regarder attentivement pour observer, cela va de soi, puisque dans ce schème épistémologique, observer consiste à constater les faits. (Comme si la chute de la pomme avait eu la même signification pour Aristote que pour Newton.)

Ainsi, l'esprit du jeune adolescent n'est pas une cire vierge que l'on peut modeler aisément et il faudra constamment nous rappeler le mot de Gaston Bachelard qui disait que : "...l'esprit est déjà vieux quand il se présente à la culture scientifique puisqu'il a l'âge de ses préjugés[5]", si nous voulons que s'opère un changement significatif dans les croyances et les habitudes intellectuelles de nos élèves. Le fait que ces croyances et ces habitudes intellectuelles résistent aux efforts déployés pour les modifier est un des résultats probants de la recherche actuelle dans le domaine de l'éducation scientifique[6].

La discussion qui précède nous fait voir que la notion d'observation tenue par les jeunes adolescents est indissociable du schème épistémologique du réalisme naïf, et l'évolution de cette notion ne pourra vraiment se dérouler que si leur schème épistémologique évolue également. On peut donc dire que poser avec les élèves le problème de la nature de l'observation scientifique

c'est déjà les inviter à entreprendre une démarche plus globale qui n'est autre que l'assimilation graduelle d'un nouvel esprit scientifique.

Les activités suggérées ci-dessous présentent aux élèves un modèle élémentaire du processus d'observation qui leur permet de prendre conscience :

- qu'observer est un processus qui diffère du simple regard;
- qu'il ne peut y avoir observation sans déséquilibre cognitif, sans question;
- qu'il faut supposer pour observer, et que cette supposition guide la cueillette d'informations.

Activité 3 : J'écoute, je sens, je touche et je regarde avec mes idées!

Cette activité peut très bien se présenter sous la forme d'un jeu. Ce dernier consiste à déterminer la nature d'un certain nombre d'objets cachés (cinq à sept) ayant les caractéristiques suivantes :

- un isolant rigide
- un objet métallique
- un ou deux liquides
- une ou deux substances granulées
- un objet inconnu des élèves

a) J'écoute

Au cours d'une première phase de l'exercice il s'agit pour l'élève de préciser la nature de l'objet à partir du bruit créé lorsqu'on le laisse tomber deux ou trois fois d'une certaine hauteur. On demande aux élèves non seulement de tenter de découvrir la nature de l'objet à partir de ce qu'ils entendent, mais également pourquoi ils pensent que l'objet est de cette nature et de consigner tout cela par écrit.

Il est important que des notes écrites existent puisque le rôle de la personne ressource sera effectivement de faire réfléchir l'élève sur sa propre démarche. Un élève aura par exemple écrit que l'objet 3 est un liquide : "parce que j'ai déjà entendu un bruit similaire et qu'il était produit par un

liquide." Voilà une belle occasion de faire prendre conscience à l'élève que ce qu'il savait déjà influence l'interprétation qu'il fera de sa perception.

b) Je sens, je goûte

Au cours des phases suivantes on permet aux élèves de sentir, de goûter et de nouveau d'identifier les objets en consignant par écrit les raisons pour lesquelles ils supposent que l'objet est de telle ou telle nature. Le rôle de la personne ressource à ce stade consistera à analyser avec les élèves l'information qu'ils auront consignée. Un certain nombre de cas peuvent se présenter :

1) Les nouvelles informations ne permettent pas de spécifier davantage la nature de l'objet et l'on conserve donc la supposition initiale.
2) Les nouvelles informations tendent à renforcer la supposition initiale, et il faut alors montrer comment celle-ci a permis une classification de l'information.
3) Les nouvelles informations tendent à mettre en doute la supposition initiale et il faut alors montrer comment celle-ci, bien que mise en doute, n'en a pas moins constitué un outil pour classer l'information.

À ce stade de l'activité il serait nécessaire de demander aux élèves de prédire ce qu'ils percevront au moment où ils toucheront aux objets. Compte tenu de la quantité d'informations qu'ils possèdent et des suppositions qu'ils ont avancées, il est donc possible de faire des prédictions. Cette partie de l'exercice nous semble fort importante dans la mesure où elle permettra de mettre en évidence le rôle joué par les suppositions (ce que l'on sait déjà) dans la cueillette d'informations.

c) Je touche

Au cours de cette phase nous suggérons que l'on procède en deux étapes. Une première au cours de laquelle on touche aux objets sans effectuer de mouvement et une seconde au cours de laquelle les objets peuvent être manipulés. Pour chacune des étapes on demande aux élèves de consigner par écrit les informations recueillies et de les confronter aux prédictions qu'ils avaient effectuées à partir de leurs suppositions.

Cette partie de l'activité nous semble vraiment cruciale dans la mesure où elle permet :

- de mettre en évidence que la perception exige une activité du sujet et que l'on ne perçoit vraiment que des différences. Par exemple, un son qui serait toujours identique à lui-même et qui ne pourrait être contrasté avec aucun autre ne serait plus discriminé par le sujet;
- de souligner que le processus d'observation intègre la démarche au cours de laquelle on confronte les événements prédits à partir des suppositions avec les informations recueillies pendant l'activité de perception.

d) Je regarde

Le moment est enfin venu de lever le voile sur le mystère et les élèves seront sans aucun doute anxieux de voir les objets cachés. Toutefois, avant qu'ils ne puissent les voir, il est de nouveau nécessaire d'exiger qu'ils prédisent ce qu'ils verront et consignent le tout par écrit en spécifiant ce pouquoi ils forment de telles attentes. Il s'agit d'une consigne importante car le travail subséquent s'appuiera sur ces écrits, puisqu'il s'agit de faire prendre conscience à l'élève :

- que l'observation au sens scientifique du terme est un processus dont l'origine se situe dans la question de départ : quelle est la nature de l'objet?
- que l'observation n'est possible que si l'on suppose quelque chose, quitte à ce que l'information recueillie provoque une révision de ce que l'on a anticipé (et ce que l'on suppose est toujours lié à ce que l'on sait);
- que l'observation ne consiste pas à regarder, toucher, écouter, goûter, sentir, bien que ce processus fasse intervenir la perception.

Quelle surprise pour les élèves que de constater que, même en voyant un objet, on ne sait pas automatiquement ce qu'il est, ou à quoi il sert. Voilà une belle occasion d'amorcer un véritable processus d'observation qui, cette fois, fera intervenir tous les sens.

Dans une certaine mesure, l'activité que nous proposons n'a rien de bien nouveau et dans de nombreux cas, des enseignants organisent des activités afin de faire prendre conscience aux élèves du rôle joué par les sens dans l'acti-

vité scientifique. C'est davantage dans le mode d'exploitation que l'on peut y déceler une différence fondamentale.

Le but explicite que nous assignons à l'activité est d'ordre épistémologique, dans la mesure où nous voulons que l'élève prenne conscience de sa propre démarche intellectuelle, du fait qu'il faut supposer pour observer, qu'en définitive on ne voit, écoute, sent et goûte qu'avec nos idées. Nous nous doutons des difficultés de l'entreprise et ce seul exercice est probablement insuffisant pour parvenir au but proposé. Toutefois, dans la mesure où les professeurs exerceront tout au long de l'année une grande vigilance, alors peut-être réussiront-ils à ébranler les convictions naïves des élèves selon lesquelles observer est une activité passive qui se résume à constater les faits.

V. LE VÉRIFICATIONNISME CRÉDULE

Que l'expérimentation permette la vérification définitive des hypothèses avancées

Il y a quelque chose de profondément sécurisant à penser que la science parvienne à établir hors de tout doute ce qu'il convient de penser et ce qu'il convient de refuser de croire. On acceptera facilement l'idée qu'en cours d'exécution de son travail, le scientifique doute des idées reçues, ou même du bien-fondé de ses propres hypothèses. On se réconfortera à l'idée qu'il existe une voie royale vers la vérité définitive : l'expérimentation. Et l'on concevra que la science procède, dans le cas où des théories incompatibles se font concurrence sur le terrain des faits, par expérience cruciale, c'est-à-dire par la mise au point d'un protocole expérimental tel qu'au terme, si l'une des théories en présence est fausse, l'autre est nécessairement vraie et réciproquement.

L'expérience que réalisa le physicien français Léon Foucault en 1850 est habituellement citée comme illustration exemplaire : il mit au point, en effet, une méthode lui permettant de mesurer la vitesse de la lumière à la fois dans l'eau et dans l'air. Or, comme il était admis que si la lumière avait une structure corpusculaire, elle se propagerait plus vite dans l'eau que dans l'air, et que si elle avait une structure ondulatoire, elle se propagerait plus vite dans l'air que dans l'eau, Foucault crut confirmer définitivement le système ondulatoire d'Augustin Fresnel (1819), et battre en brèche à tout jamais la théorie de l'émission d'Isaac Newton (1675). La méthode de Foucault consistait "à déterminer de quel angle a tourné un miroir en rotation rapide pendant le temps que met le rayon lumineux à effectuer un parcours

aller et retour de quelques mètres entre ce miroir et un autre miroir, fixe celui-ci, qui le renvoie sur le premier[7]." Foucault calcula que la vitesse de la lumière n'est que de 221 000 km/s dans l'eau, alors qu'elle est de 298 000 km/s dans l'air, ce qui fut reçu comme assurant le triomphe définitif de la théorie ondulatoire. Mais comme on le sait maintenant, Einstein fournit en 1905 son interprétation de l'effet photoélectrique fondée sur l'hypothèse des quanta de Planck, et on eut droit en 1924 à la théorie synthétique des ondes et des corpuscules de Louis de Broglie : cette dernière théorie, qui pose l'existence d'une onde associée à toute particule en mouvement, fut expérimentalement corroborée par la découverte fortuite, en 1927, par Davisson et Germer, de la diffraction des électrons par les cristaux.

Que conclure de cet épisode historique? D'abord et avant tout qu'il importe de distinguer preuve expérimentale et démonstration mathématique. Bien sûr, on a raison d'insister sur le fait qu'avec Galilée la physique s'est mathématisée, et que Newton répudia la méthode des hypothèses a priori pour n'admettre en "philosophie naturelle" que des démonstrations proprement mathématiques. C'est la mathématisation de la nature qui marque la coupure entre la science médiévale, toute qualitative, et celle de l'époque moderne. Cet esprit scientifique moderne, entièrement informé de mathématiques, se manifeste chez Descartes, entre autres. C'est cette tournure d'esprit qui l'amena à user de trigonométrie pour rendre raison des angles d'incidence et des angles de réfraction des rayons lumineux (1619) : des tables fort exactes de ces angles étaient connues depuis longtemps, mais l'explication réelle, mathématique donc, exigeait le concept de sinus. Mais le projet général de décoder la nature comme un ensemble de messages chiffrés est dû à l'époque de Galilée : non seulement la science allait se transformer, mais du coup, elle allait imprimer un essor considérable au développement des mathématiques elles-mêmes.

Ainsi mathématisée, la nature devient une machine; et l'humanité occidentale, par la construction d'une pensée exacte, en vient à croire qu'elle transcende cette nature, qu'elle lui est supérieure et, à la limite, qu'elle peut en disposer. Mais il importe de remarquer également que si la mathématisation de la physique institue l'objectivité scientifique véritable, elle s'est

opérée de pair avec la multiplication des expériences : car à l'époque même où l'on a cru bon de croire qu'expliquer consistait avant tout à fournir une représentation géométrique, on a cru tout autant qu'expliquer la nature revenait, en dernière instance, à construire artificiellement des modèles mécaniques révélant les forces et principes réels en présence desquels nous étions. Ici, pour certaines que soient nos mathématiques, elles ne fournissent tout au plus qu'une interprétation parmi d'autres des phénomènes observables : le chemin qui va de la collecte des faits aux hypothèses explicatives n'est pas nécessaire, et nos hypothèses, si assurées qu'elles puissent paraître, seront toujours sujettes à révision.

Élimination pédagogique

Au cours des 20 dernières années, on a beaucoup mis l'accent dans l'éducation scientifique sur la nécessité pour les élèves de réaliser des expériences en laboratoire. Cette insistance découlait tout naturellement des nouvelles orientations proposées pour l'éducation scientifique des jeunes. Il n'était plus question d'enseigner une série de faits, de lois, mais bien d'initier les élèves à la physique du physicien, à la chimie du chimiste, à la biologie du biologiste, c'est-à-dire former à la science plutôt que d'informer. À la tête bien pleine, on a voulu substituer la tête bien faite, en accord avec les principes de la pédagogie active. Ces intentions générales se sont d'abord concrétisées par des objectifs tels que :

- assimilation de la pensée scientifique;
- assimilation de la démarche expérimentale;
- assimilation des concepts intégrateurs;
- assimilation d'attitudes scientifiques (esprit critique, doute méthodique, etc.).

Elles se sont matérialisées ensuite dans la production d'outils pédagogiques tels que le PSSC, le CHEMStudy, le BSCS et toutes les adaptations régionales ou nationales qui ont suivi. En bref, sans que les élèves redécouvrent l'ensemble des lois et théories de la science, on allait leur fournir les outils nécessaires pour qu'ils puissent vivre le processus qui conduit à leur édification.

L'enthousiasme créé par la mise en oeuvre de cette nouvelle vision de l'enseignement des sciences constitue probablement un fait sans précédent dans l'histoire de la pédagogie. Enseignants, concepteurs, formateurs ont uni leurs efforts afin de réaliser les objectifs de la réforme. Au terme de quelques 20 années, quel genre de bilan pouvons-nous tracer?

Au cours des quatre ou cinq dernières années, un certain nombre d'études ont été réalisées et Welch, Klopfer, Aikenhead et Robinson[8] en font une analyse pour le moins percutante, dont voici quelques extraits :

> En dépit des nouveaux curricula, de professeurs mieux préparés, d'équipements matériels meilleurs, les attentes optimistes en vertu desquelles les élèves deviendraient de bons investigateurs ne se sont jamais réalisées (p. 33).
>
> Même si les enseignants manifestaient une attitude positive face au mode investigationnel (inquiry), très souvent, ils se sentaient davantage responsables vis-à-vis de l'apprentissage des faits, de ce qui apparaît à l'examen, des notions de bases (basics) et de l'éthique du travail (p. 37).
>
> La seconde observation des enseignants est à l'effet que le mode investigationnel n'est pas adapté à la majorité des élèves. Seuls les plus brillants s'accommodent d'une telle démarche (p. 37).
>
> ...la plupart des élèves n'ont même pas l'occasion d'assimiler les habiletés élémentaires associées au processus investigationnel... (p. 38).
>
> La science est quelque chose que l'enseignant a appris au collège ou à l'université, et non quelque chose qu'il a vécu en tant que processus d'investigation. Il n'est donc pas surprenant de constater que dans les 11 laboratoires des écoles secondaires que nous avons observés, il était très rare que les élèves fussent engagés dans un processus créatif de recherche, d'investigation (p. 38).
>
> Les valeurs associées à la pensée spéculative et créatrice étaient souvent ignorées et même parfois ridiculisées (p. 39).

On pourrait allonger presque indéfiniment cette liste de citations qui nous conduisent à une conclusion : les objectifs proposés il y a deux décennies n'ont pas été atteints. Les élèves n'ont pas assimilé les savoirs, les savoir-faire et les savoir-être associés à la pensée scientifique et à la méthode expérimentale. On peut également affirmer sans risquer de se tromper

qu'ils n'ont pas réfléchi au statut de l'expérimentation dans la démarche scientifique.

On ne devrait guère être surpris des conclusions qui s'imposent à la suite des études qui ont été mentionnées. En effet, l'enseignement des sciences au niveau secondaire, dans la grande majorité de nos écoles, est organisé en fonction de l'hypothèse pédagogique la plus douteuse que l'on puisse imaginer. Nous la formulerions de la façon suivante :

> Les 32 élèves de la classe X formuleront chaque semaine, le même jour, à la même heure, la même hypothèse reliée à la solution du même problème. Ils la vérifieront avec des montages expérimentaux identiques.

Quoiqu'un peu lapidaire, cette formule résume l'essentiel de la situation, à savoir que dans les conditions actuelles, le travail effectué en laboratoire par les élèves ne peut être qu'un simulacre de la démarche suivie par les scientifiques. En vérité, l'hypothèse est établie par l'enseignant et le travail de l'élève consiste à manoeuvrer de façon à retrouver les résultats prévus à l'avance. Règle générale, la majorité des élèves ne savent pas trop ce dont il est vraiment question et ils se contentent de suivre pas à pas les indications fournies dans le guide de laboratoire, un peu comme ils le feraient pour une recette de cuisine. La validité des résultats obtenus n'est presque jamais remise en question et, à la limite, lorsque vraiment l'expérience ne fonctionne pas, le professeur impose une conclusion. On demande à l'élève de rédiger un rapport de laboratoire qui sera corrigé, mais dont les résultats ne seront que très rarement utilisés en classe.

Dans une telle situation, on comprend mieux pourquoi les élèves n'assimilent pas les habiletés et les attitudes intellectuelles associées à la démarche expérimentale. En effet, ils ne vivent pas la situation, ils se contentent de vérifier, au mieux, ce que l'enseignant a décrété, a imposé, souvent par des arguments d'autorité.

Activité 4 : Une "boîte noire" nouveau style

Il ne semble pas y avoir mille solutions possibles si nous voulons que les élèves saisissent la nature du rôle de l'expérimentation dans le processus de création des connaissances scientifiques. Il est nécessaire qu'ils vivent eux-mêmes la situation, mais cela pose évidemment des problèmes d'ordre pratique. Comment, par exemple, dénicher un problème dont le niveau de complexité soit adapté aux capacités de ces jeunes esprits et qui, d'autre part, permette vraiment de réaliser des expérimentations?

On a souvent suggéré aux enseignants d'utiliser la "boîte noire" comme outil pédagogique. On enfermait dans une boîte scellée un certain nombre d'objets en demandant aux élèves de les décrire sans toutefois regarder à l'intérieur. L'élève pouvait agiter la boîte afin de reconnaître des bruits familiers ou passer un aimant près de la surface externe afin de détecter la présence d'objets métalliques, etc. On comparait ensuite le contenu de cette boîte avec les prédictions des élèves, en essayant de faire saisir en quoi cette activité ressemblait à la quête du savoir scientifique.

Cet exercice est certes intéressant mais limité car il ne permet guère de faire des mesures, il n'offre pas une activité de modélisation très poussée puisqu'il s'agit simplement de classifier des objets, et simule mal l'activité scientifique puisqu'on finit par regarder dans la boîte. Afin de prendre en considération ces lacunes nous proposons une "boîte noire" nouveau style[9].

En fait, il s'agit d'un exercice de modélisation effectué à l'aide d'un dispositif fort simple illustré dans la figure ci-dessous.

Au-dessus d'une forme métallique qui repose sur une table, on dépose un morceau de contre-plaqué et le tout peut être fixé à l'aide d'une vis ou d'un écrou. L'espace entre la table et le morceau de contre-plaqué est tel qu'une bille d'acier peut tout juste passer et entrer en collision avec la forme métallique. La forme de même que le contre-plaqué sont peints en noir de façon à déjouer l'oeil malicieux, car il s'agit dans cet exercice de créer un modèle de la forme, en lançant des billes et en analysant des trajectoires.

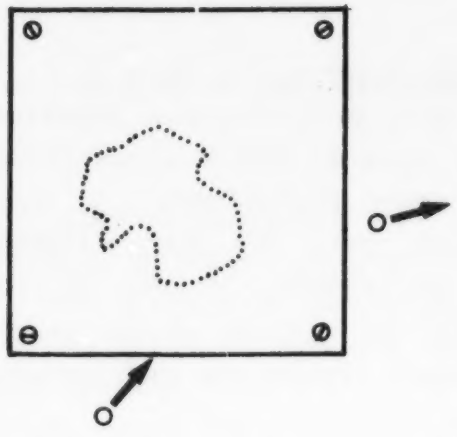


Figure 2 : La boîte noire

La stratégie pédagogique que nous suggérons peut être décrite dans ses grandes lignes de la manière suivante :

1) L'ensemble des élèves de la classe constitue un microcosme dont les caractéristiques sont semblables à celles de la communauté scientifique.
2) Les élèves sont regroupés en équipe (2 ou 3 individus) qui constituent autant de groupes de recherche.
3) L'ensemble des décisions quant à la validité des modèles repose sur la collectivité.
4) Le rôle de l'enseignant est d'animer la collectivité et de susciter une réflexion d'ordre épistémologique.

Il ne s'agit pas là d'une prescription et il existe probablement de nombreuses façons d'exploiter ce jeu compte tenu des besoins définis par les enseignants.

a) Identification de la forme

Le premier exercice proposé aux différentes équipes consiste à créer un modèle iconique ou géométrique de la forme cachée. À cette fin, il s'agit de lancer la bille un nombre suffisant de fois et d'analyser les trajectoires. On peut ainsi tracer point par point un modèle de la forme de l'objet caché.

Le but de cet exercice est fort simple, on en conviendra. Il s'agit de faire saisir aux élèves que l'on peut créer une connaissance d'un objet sans pour autant le voir ou recevoir de celui-ci des informations qui parviennent directement aux sens. Mais nous soulignons ici qu'il est très important que

les élèves ne voient pas la forme, qu'ils ne puissent pas, après coup, comparer leur dessin avec la forme elle-même. Il nous paraît d'ailleurs plus intéressant, dès le départ, de les faire travailler sur une forme complexe de façon à ce que les différentes équipes puissent confronter entre elles leur modèle. En somme, il s'agit de créer une situation similaire à celle que l'on rencontre en sciences où le modèle retenu est celui qui permet le mieux de prédire le comportement des phénomènes.

Déjà à ce stade, il est possible d'amorcer une discussion d'ordre épistémologique. On peut à l'aide de questions similaires à celles qui suivent induire chez les élèves un déséquilibre cognitif :

1) Combien de fois est-il nécessaire de lancer la bille pour être absolument certain de la nature de la forme qui est cachée? 10, 100, 1 000,... , 1 000 000,...?
2) Si on répétait l'expérience en d'autres lieux, à d'autres moments, peut-on être certain de retrouver les mêmes résultats?
3) La forme qui a été dessinée est-elle vraiment identique à l'objet que l'on veut connaître?
4) La connaissance obtenue à l'aide de cette procédure est-elle un simple reflet de ce qu'il y a sous le morceau de contre-plaqué?
5) Comment peut-on décider collectivement du meilleur modèle?

b) Essayons de mieux prédire

Le modèle iconique ne sera qu'une approximation grossière de la forme cachée si celle-ci est relativement complexe. Comment alors prédire des événements (trajets de la bille) avec plus de précision?

On peut demander aux élèves d'effectuer des mesures des angles d'incidence et de réflexion, associés aux trajectoires des billes, et de porter ces valeurs sur un graphique. On est dès lors en possession d'un outil différent pour prédire les événements puisque par interpolation ou extrapolation on peut pour une valeur α identifier une valeur θ. Ces valeurs sont-elles plus précises que celles qui pouvaient être obtenues à l'aide du modèle iconique? Comment peut-on être certain des valeurs prédites θ lorsque la valeur α se situe entre deux valeurs mesurées? Ne sommes-nous pas obligés de postuler la continuité de la forme? Quelle est le degré de précision acceptable pour les mesures?

Autant de questions qui orientent la réflexion sur des problèmes vécus par les scientifiques.

De nouveau, par une interrogation appropriée, il est possible d'induire un déséquilibre cognitif chez les élèves. On peut par exemple demander :

1) Est-il absolument nécessaire de construire un modèle géométrique de la forme afin de prédire des événements?
2) Le graphique constitue-t-il une connaissance de l'objet?
3) Est-ce que cette connaissance rend parfaitement compte de la nature de l'objet?
4) Cette connaissance est-elle aussi valable qu'une représentation géométrique?
5) Est-ce que les expériences réalisées prouvent hors de tout doute leur hypothèse?

Il faudra également à ce stade susciter une interrogation quant à la validité de la connaissance construite. Les valeurs des angles dépendent-elles d'autres facteurs tels la vitesse des billes, la nature des billes, la nature des surfaces sur lesquelles elles roulent, etc.?

c) Du graphique à l'équation

L'étape suivante consiste à demander aux élèves de formuler une loi permettant de prédire le comportement du phénomène, c'est-à-dire de formaliser la relation entre l'angle d'incidence θ et l'angle de réflexion α, sous la forme d'une équation algébrique de la forme $\alpha = f(\theta)$. Il suffit alors de connaître θ pour prédire α et le recours à l'intuition géométrique n'est alors plus nécessaire.

À ce stade il nous paraît à nouveau nécessaire de formuler des questions qui risquent d'induire un déséquilibre cognitif. Entre autres on peut demander aux élèves s'ils croient qu'une équation est une connaissance valable du phénomène? Si cette connaissance correspond à la réalité, s'il est nécessaire de savoir ce qu'il y a là-dessous pour prédire le comportement du phénomène... y a-t-il vraiment quelque chose là-dessous? Combien d'expériences devraient-ils réaliser pour être absolument certains de ce qu'ils avancent?

d) Du raisonnement causal au raisonnement probabiliste

Il est relativement facile de créer une situation qui exige de la part des élèves l'utilisation d'un raisonnement probabiliste. Il suffit pour cela de faire varier la forme en la faisant bouger lentement autour de son axe. Il devient alors difficile et probablement impossible pour les élèves de cet âge de déterminer le contour de la forme. Mais cela constitue une introduction intéressante au raisonnement probabiliste en science. En effet ce qu'ils pourront faire au mieux c'est prédire que pour une valeur a la valeur θ sera probablement située entre θ_1 et θ_2. Mais alors s'agit-il d'une connaissance valable du phénomène? Quel genre de certitude l'expérience fournit-elle dans ce cas?

L'utilisation d'un dispositif de la nature de celui que nous venons de décrire, afin de simuler à la fois l'expérimentation scientifique et le comportement de la collectivité scientifique, exige beaucoup de doigté de la part de l'enseignant. Mais il peut certes contribuer à amorcer chez les élèves une réflexion épistémologique portant tout autant sur la nature de la connaissance scientifique que sur le rôle de l'expérimentation dans la création de cette connaissance. Mais attention pour ne pas que les élèves voient la forme, ils croiront alors vraiment la connaître.

Nous tenons en terminant à souligner que le changement conceptuel envisagé dans cette section ne peut s'opérer qu'à long terme. Les seuls exercices que nous suggérons ne suffiront pas à l'induire et il est donc nécessaire que ce type d'apprentissage acquière aux yeux de l'enseignant une importance aussi grande que les apprentissages habituels.

VI. L'IDÉALISME AVEUGLE

Que le scientifique soit un être objectif parfaitement désintéressé

L'image du savant isolé dans son cabinet de travail ou dans son laboratoire et affrontant seul des faits déjà connus qui ont jusque-là résisté à toute explication convenable hante encore notre imaginaire. Nous avons toujours tendance à nous représenter le chercheur comme un être humain coupé de son milieu d'attache, délibérément séparé du reste du monde parce que refusant les idées dominantes de son époque, et cherchant, par ses seules ressources, à percer à jour l'énigme que constitue une certaine sorte d'événements ou de phénomènes. De là, nous l'imaginons suffisamment créateur pour inventer ses instruments de mesure et d'analyse, et pour découvrir, parfois par chance mais toujours grâce à son génie propre, la solution au problème préalablement posé et resté sans solution jusque-là. Nous concevons assez communément le savant comme un être coupé de son contexte.

Qui plus est, nous en faisons vite un être placide et imperturbable, quelqu'un pourvu d'une nature seconde qui le rend capable de rester impassible devant tout ce qui est susceptible de troubler la plupart d'entre nous, quelqu'un dépourvu d'émotions ou capable d'en surmonter les effets néfastes sur la pensée rationnelle. C'est ainsi que nous concevons le chercheur scientifique comme un pur esprit, comme un être situé au-dessus de la mêlée et capable de s'abstraire du milieu extérieur pour exercer sa faculté de pensée en toute objectivité et à l'écart des intérêts qui habituellement nous assaillent et ne manquent pas de déformer notre perception des choses. Dans cette perspective, être un scientifique c'est n'être pas mû par le désir matériel, c'est-à-dire par la recherche du prestige et de la gloire, par la volonté de gravir rapide-

ment les échelons de la profession, par l'appât du gain et la conquête du pouvoir. C'est, tout au contraire, ne laisser altérer son jugement par aucune préférence personnelle, ne laisser place à aucun arbitraire, accepter de s'en tenir à la seule appréhension des faits en rejetant par avance tout jugement de valeur qui trahisse une prédilection subjective. Ici, l'esprit scientifique n'est mû que par le seul appétit de connaître et sa soif de vérité est telle qu'il ne saurait chercher avantage pour lui-même dans l'édification de son savoir.

Le mythe de l'esprit scientifique désincarné a pour nous trop duré. Nous avons à tort imaginé longtemps l'histoire de la science comme une suite ininterrompue de rares épisodes au cours desquels, presque miraculeusement, s'exerçait l'intuition géniale d'un esprit impartial. Comment ne pas comprendre, dès lors, que devant pareille dramatisation, non seulement le commun des mortels se désintéresse de l'activité de la recherche scientifique, mais encore qu'il se sente rien moins qu'exclu d'une telle entreprise? Si l'on prétend que la science n'est le fait que de quelques-uns, et des plus forts en thème, comment se pourrait-il que le plus grand nombre se risque à tenter d'y comprendre quelque chose? Si l'histoire des sciences que l'on écrit ne révèle que les réussites les plus spectaculaires, à savoir les révolutions scientifiques, la science concrète, elle, est autrement "normale" : il faut voir en effet que si chacune de ces performances prestigieuses -- et ici l'on pense, entre autres, à Copernic, Newton, Darwin, Marx, Freud, Einstein -- a créé par sa force d'attraction propre un engouement tel qu'une tradition de recherche radicalement renouvelée s'en est ensuivie, avec sa problématique, sa conceptualité, ses standards de solution et ses présupposés, il faut voir que ce succès n'est pas dû au hasard et qu'il a ses conditions de possibilité historique.

Car la science est le travail social par excellence. Quoi qu'il en soit des dispositions personnelles requises, et ne nions pas qu'il en existe, un(e) scientifique n'est rien de plus génial(e) dans son champ d'exercice qu'un artisan, un(e) artiste, un travailleur à l'esprit créateur dans son domaine d'intervention spécifique. L'activité scientifique ne s'accomplit pas en vase

clos : les chercheurs bénéficient du travail fait par d'autres avant eux ainsi que du travail de leurs contemporains, qu'ils l'approuvent, du reste, ou qu'ils tentent de l'invalider. Une bonne théorie scientifique a beau être le résultat de l'acharnement personnel de quelqu'un, elle est avant tout le fruit d'accomplissements d'ensemble, accumulation de performances diverses, perçées et/ou impasses, et, comme tel, elle se révèle être la résultante d'un effort collectif le plus souvent occulté.

L'objectivité, ici, n'est pas une attitude prise par quelqu'un dans un face à face avec la nature, attitude que l'on atteindrait en se débarrassant de ses préjugés et de ses motivations personnels. L'objectivité qui est requise dans la recherche tient plutôt d'une attitude que l'on a à l'égard des autres : elle est le fait de ceux qui prétendent avoir de bons arguments pour soutenir telle ou telle hypothèse explicative, et qui sont ouverts d'emblée à la discussion et au contrôle de leurs arguments. Point n'est nécessaire ici de n'avoir aucun désir ou intérêt personnel. La seule chose exigée est la testabilité. Tout argument est objectif et acceptable comme tel pour autant qu'il se prête à une vérification. Cette vérification vise à établir non pas tant la vérité que le bien-fondé de l'argument (c'est-à-dire l'absence de bonnes raisons qu'on pourrait avoir de n'en pas faire cas, de n'en pas tenir compte, de l'ignorer temporairement ou de l'écarter définitivement pour vice de forme). Croire que le jeu de rôles particulier qui définit socialement la pratique de la science interdit d'avoir des passions, neutralise les éventuels intérêts individuels de tout un chacun et n'est axé que sur la seule volonté de savoir, c'est tomber dans l'idéalisme aveugle et s'illusionner sur le type d'objectivité que requiert cette activité. L'intérêt ne fait pas obstacle à la connaissance scientifique objective, il lui donne plutôt son impulsion constante.

Dénonciation pédagogique

Nous avons suggéré à ce stade un certain nombre d'activités visant à faire vivre aux élèves le processus d'objectivation, ce qui constituait un début de dénonciation de l'idéalisme aveugle. Dans la foulée de cette démarche de

démystification, il nous semble maintenant nécessaire d'introduire l'histoire des sciences comme moyen privilégié.

L'histoire des sciences est une des parentes pauvres de l'éducation scientifique. Il n'est point besoin d'une longue enquête pour prendre conscience du caractère anhistorique de l'enseignement des sciences. Un examen rapide des curricula, des manuels et une connaissance minimale de la pratique de cet enseignement révèle que l'histoire des sciences est à toutes fins utiles absente des préoccupations de ceux qui sont engagés dans ce milieu.

On peut résumer la situation de la façon suivante :

1) Les manuels, s'ils ne font pas totalement fi de l'histoire des sciences, se limitent à présenter une histoire événementielle en associant aux diverses lois le nom des grands découvreurs (Galilée, Newton, Dalton, Mendel, etc.). On parlera alors de la loi de Galilée, de Newton, de Mendel, etc. À l'occasion, on trouvera un compte rendu de la démarche intellectuelle qui a conduit tel ou tel savant à la découverte d'une nouvelle loi, mais toujours sous l'angle de la caricature. Ici et là, on trouvera quelques notes biographiques décrivant la vie et l'oeuvre d'un savant. Ces notes biographiques revêtent l'aspect de l'éloge funèbre dont on sait qu'il est généralement glorifiant.

2) Sur le plan de l'activité quotidienne, on peut affirmer que la grande majorité des enseignants ne se réfèrent pas à l'histoire des sciences. S'ils le font, c'est généralement pour rappeler ce que l'on retrouve dans les manuels, et encore... Le niveau d'utilisation de l'histoire des sciences ne dépasse pas le niveau anecdotique de la pomme de Newton ou du cerf-volant de Franklin. S'il arrive quelquefois que l'enseignant s'attarde quelque peu à un personnage particulier, ce sera pour souligner sa grande intuition, son génie, son ardeur au travail, sa ténacité, son austérité, son apport significatif à l'avancement des sciences et les conséquences positives de son travail (progrès) pour l'humanité. Le plus bel exemple est celui de Pasteur, qui a été salué de son vivant comme un bienfaiteur de l'humanité : "Droit, honnête travailleur, il a consacré sa vie à la science et fait des découvertes qui ont sauvé des milliers de vies."

3) Au niveau des curricula, on ne peut pas vraiment parler d'une véritable intégration de l'histoire des sciences. L'organisation logique des contenus ne se prête d'ailleurs pas à cette intégration quoique dans certains cas (fort peu nombreux) l'élève est amené à étudier des modèles de phénomènes qui se sont succédés historiquement.[10]

En somme, comme le souligne Russell[11], l'histoire des sciences est non seulement absente de l'éducation scientifique mais le peu d'histoire des sciences que l'on enseigne ressemble fort peu à l'histoire des sciences telle qu'elle est produite par les historiens professionnels.

Ce statut de l'enseignement de l'histoire des sciences, dans le cadre de l'éducation scientifique, risque de faire naître ou de renforcer un certain nombre de croyances dont les suivantes :

- la science se développe de façon linéaire, logique, un peu à l'image de la table des matières du livre;
- la science évolue grâce à l'intervention périodique d'hommes et, à l'occasion, de femmes affublés du qualificatif de génie;
- les scientifiques sont essentiellement motivés par l'idéal associé au développement de la connaissance;
- la science évolue indépendamment du contexte socio-économique et culturel d'une époque.

En somme, l'idéalisme aveugle. Et cette forme de croyance ne peut être débusquée, déracinée, que si l'enseignement intègre l'histoire de la discipline. Mais alors de quelle histoire s'agit-il?

En première approximation, Thomas Kuhn distingue deux courants historiographiques principaux qui donnent lieu à deux types d'histoire des sciences, l'histoire interne et l'histoire externe[12]. Il les définit de la façon suivante :

- l'histoire interne est celle qui se préoccupe de l'étude de la science en tant que savoir, en tant que champ de connaissance;
- l'histoire externe est celle qui se préoccupe de l'étude des activités des scientifiques en tant que groupe social dans le contexte d'une culture plus large.

Si cette distinction a, de prime abord, le mérite de nous faire comprendre que l'histoire des sciences peut donner lieu à des types d'études fort différents, elle risque, cependant, de nous induire en erreur. En effet, l'histoire des sciences n'est, au demeurant, qu'un des aspects d'un savoir plus large,

plus englobant qui n'est autre que l'histoire générale que les historiens modernes qualifient de problématique, globale, sociale et structurale[13]. Problématique car elle pose des questions et tente de les résoudre; globale parce qu'elle se préoccupe de toutes les dimensions de l'homme; sociale parce qu'elle s'élargit aux groupes sociaux et structurale parce qu'elle étudie les phénomènes de longue durée. Toute l'histoire y compris l'histoire des sciences possède ces caractéristiques.

Dans ce contexte, l'histoire interne, bien qu'elle puisse aider à saisir, par exemple, que l'évolution de la connaissance scientifique ne constitue pas un processus linéaire, logique, continu, ne saurait vraiment être explicative car elle ne tient compte des dimensions globales, sociales et structurales des phénomènes historiques. C'est cette position qu'adopte Pierre Thuillier lorsqu'il dit :

> Bien souvent par prudence, par inconscience ou par manque d'imagination, ces aspects socio-culturels de "la science" et de l'épistémologie sont laissés de côté ou à peu près totalement négligés; et tout se passe comme si les problèmes relatifs à l'entreprise scientifique devaient être étudiés prioritairement ou même exclusivement dans la perspective du savoir pur. Une telle attitude, en droit, est légitime : les théories scientifiques ont des caractères spécifiques et peuvent à coup sûr faire l'objet d'études épistémologiques spécialisées. Mais, concrètement, qu'on le veuille ou non, "la science" a une existence sociale et de nombreux enjeux également sociaux (idéologiques, politiques, culturels, éthiques, etc.). C'est pourquoi, je pense, il convient de prendre en compte tous ses aspects, et de la considérer comme une institution humaine (au sens le plus fort de l'expression).[14]

Autrement dit, il ne saurait y avoir une histoire des sciences vraiment éclairante que dans la complémentarité de l'histoire interne et de l'histoire externe, lorsque le phénomène historique reçoit tout l'éclairage.

La révolution copernicienne offre un exemple intéressant de cette nécessaire complémentarité des visions historiques. Harvey Siegel relate un passage de l'histoire des sciences tiré du Harvard Project Physics, en soulignant comment les auteurs insistent sur l'arbitraire que comportait le choix entre le système de Copernic et celui de Ptolémée, et sur l'influence des facteurs

religieux et sociaux qui entravaient cette révolution intellectuelle. Voici donc ce passage :

> Mis à part sa simplicité apparente, le système de Copernic ne présentait pas d'avantages scientifiques marqués par rapport à la théorie géocentrique. Aucune des observations connues ne s'expliquait mieux par une théorie que par l'autre. Copernic avait un point de vue différent, mais il ne présentait aucun type d'observations nouveau, aucun type de données expérimentales qui ne pouvait s'expliquer dans le cadre de la vieille théorie. De plus, la précision de ses prédictions ne dépassait guère celle de Ptolémée. Comme Francis Bacon l'écrivait au début du XVII^{e} siècle : "On peut maintenant facilement voir que le phénomène supporte également et indifféremment le point de vue de ceux qui pensent que la Terre tourne, que le point de vue de ceux qui adhèrent à l'ancienne théorie."
>
> En résumé, le schème de Copernic centré sur le Soleil était scientifiquement équivalent au schème géocentrique de Ptolémée dans son explication des observations astronomiques. Mais, philosophiquement, il semblait faux, absurde, dangereux. La plupart des Européens éduqués de cette époque reconnaissaient les écrits de la Bible et d'Aristote comme deux sources d'autorité suprême. Les deux sources semblaient contestées par le système copernicien. La liberté de pensée qu'a marquée la Renaissance était hésitante. Mais la vieille image de l'univers procurait stabilité et sécurité à un grand nombre d'individus. La croyance dans le système centré sur le Soleil offrait plus de simplicité que le système centré sur la Terre. Mais, à l'époque de Copernic, cela semblait contredire le sens commun et l'observation. L'adhésion à ce nouveau système exigeait une révolution tant philosophique et religieuse que scientifique. Il n'est alors pas surprenant que Copernic ait eu si peu de supporteurs.[15]

Dans ce contexte, on voit très bien qu'on ne peut expliquer l'évolution des idées scientifiques sans référer au contexte plus large tant du point de vue social que culturel. Certes, l'exemple est fort incomplet mais il fournit une illustration de ce que nous avancions au début du paragraphe, et Kuhn a qualifié cette nécessaire complémentarité des deux approches de défi pour l'histoire des sciences.

C'est donc une histoire critique, globale, qui s'accorde le mieux avec nos objectifs de démystification de la science. Mais dans quelle mesure ces objectifs s'accordent-ils avec ceux qui sont proposés pour l'enseignement général de l'histoire? Si on réfère au point de vue développé par Christian Laville, représentant canadien au Congrès international des Sciences historiques de Bucarest (août 1980), on ne peut que s'étonner de la proximité des

points de vue. Ce dernier propose, en effet, comme rôle pour l'enseignement de l'histoire : "développer l'autonomie intellectuelle du citoyen afin qu'il puisse mieux connaître, comprendre et expliquer les sociétés présentes et passées, mieux participer au mouvement social et aux choix collectifs qui orientent l'avenir[16]." Or, démystifier la science ne constitue-t-il pas une façon de favoriser le développement de l'autonomie intellectuelle des élèves? N'est-ce pas une façon de fournir des outils qui permettront aux individus et aux groupes de participer aux choix et décisions dans une société où la science joue un rôle de plus en plus important à tout point de vue?

Cet accord entre les finalités proposées pour l'enseignement de l'histoire et l'enseignement des sciences va bien au delà des grandes généralités quand on se penche sur la nature des savoir-faire, des connaissances et des attitudes qui rendent opératoires ces objectifs généraux. Tout enseignant reconnaîtra aujourd'hui la nécessité pour l'élève d'assimiler les savoir-faire intellectuels associés à la démarche scientifique, des concepts intégrateurs plutôt que des connaissances factuelles, et des attitudes telles l'esprit critique, la suspension de jugement, etc. Or, on constate des recoupements étonnants entre ces objectifs et ceux qui sont proposés pour l'enseignement de l'histoire si on fait exception des concepts proprement disciplinaires. Mais dans la mesure où l'enseignement des sciences intègre l'histoire des sciences, alors, il n'y a plus seulement recoupement entre les objectifs mais convergence des objectifs. Autrement dit, on ne peut intégrer l'histoire des sciences à l'éducation scientifique d'une façon intelligente que selon les critères de la science historique.

Activité 5 : Watson et Crick

Cette première activité ne constitue pas à proprement parler un cours d'histoire des sciences. Elle suggère plutôt des modes d'exploitation d'un document historique bien connu, La double hélice, en vue de dénoncer cette dimension de l'idéalisme aveugle associé à la pseudo-objectivité du scientifique.

Le volume de Watson, bien que présentant le point de vue de ce dernier sur la petite histoire de la découverte de la structure moléculaire de l'ADN, a le mérite de décrire les principaux acteurs de cet épisode de l'évolution de la science au cours de leurs interactions, en plus de pouvoir facilement être lu par de jeunes adolescents. Ceux-ci ne manqueront pas de noter même au premier coup d'oeil que les participants à cette aventure intellectuelle sont mûs et inspirés par des sentiments, des ambitions de toutes natures. On peut dès lors imaginer au moins deux modes d'exploitation.

a) Analyse critique

Il est relativement facile de préparer un questionnaire qui permettrait aux élèves d'identifier les aspirations, les ambitions, les préjugés des divers acteurs. D'autre part, il devient possible également d'identifier le processus en vertu duquel les auteurs de la découverte ont dû soumettre leurs hypothèses à l'épreuve du test expérimental. Enfin, on peut ensuite engendrer une discussion autour de questions telles que :

1) Watson et Crick auraient-ils pu faire leurs découvertes sans connaître les travaux de Wilkins et Franklin?
2) De quelle manière les auteurs sont-ils redevables à Linus Pauling?
3) Dans quelle mesure l'espoir d'obtenir le prix Nobel constitue-t-il la principale source de motivation des deux découvreurs?

b) Jouer à Crick et Watson

Pourquoi ne pas écrire un scénario à partir du livre de Watson? Il est possible que certains élèves soient intéressés à écrire puis à jouer un tel scénario devant leurs confrères et consoeurs. Il pourrait ensuite s'engager entre les interprètes et les spectateurs une discussion autour de l'interprétation qui a été faite du récit de Watson. L'animateur (professeur) pourrait diriger la discussion afin de faire ressortir le caractère objectif de la démarche des scientifiques mais également le caractère subjectif des démarches personnelles.

Activité 6 : Darwin et Cie

L'année 1982 marqua le centième anniversaire de la mort de Charles Darwin et l'occasion aura été fort belle pour entreprendre avec les élèves une démarche

d'histoire critique. En effet que n'a-t-on pas écrit au cours de l'année sur ce célèbre anglais co-concepteur avec Alfred Wallace de la théorie de l'évolution : ce n'est donc pas la documentation qui manque. Comment donc exploiter cet événement extraordinaire avec de jeunes adolescents du niveau secondaire? Il y a, on s'en doute bien, plusieurs façons de le faire et chaque enseignant trouvera celle qui convient le mieux aux besoins de sa classe, mais nous prenons sur nous de suggérer ci-dessous une stratégie pédagogique :

a) Phase 1

Le professeur dans une courte introduction fait part aux élèves de l'événement particulier qui fait l'objet de la fête. Il propose ensuite aux élèves de recueillir des articles publiés dans les revues et les journaux à l'occasion de cet anniversaire.

b) Phase 2

Une fois la collecte d'articles complète débute le véritable travail, qui consiste pour les élèves à analyser ces documents afin de mettre en relief :

- le portrait que l'on trace de cet illustre personnage;
- les réalisations scientifiques qui ont été les siennes;
- les controverses soulevées par ces publications.

c) Phase 3

À la suite de ce premier travail, l'enseignant propose par exemple un point de vue équivalent à celui qui est exposé par Thuillier dans Darwin & C afin d'offrir aux élèves une vision contrastée par rapport à celle qu'ils ont pu dégager de l'ensemble des articles. Il peut alors s'ensuivre une discussion extrêmement intéressante. Ainsi on peut se demander pourquoi, dans ses livres publiés, Darwin ne fait jamais part au lecteur de ses interrogations d'ordre métaphysique et épistémologique, pourtant déterminantes dans ses conceptions scientifiques. On peut également se demander comment il se fait qu'il n'ait pas davantage protesté contre la récupération sociale de ses idées, en particulier dans le cas de l'eugénisme fondé par son cousin Galton. On peut également sonder les intentions de ceux qui ont écrit ces articles presque toujours

sans véritables fondements historiques. Il ne faudrait cependant pas dans tout cela oublier le but principal de l'exercice qui est de mettre en lumière le caractère essentiellement personnel de la démarche de connaissance de Darwin.

L'intégration de l'histoire des sciences à l'éducation scientifique pose des exigences nouvelles aux enseignants en science. On ne devient pas historien par simple déclaration et la didactique de l'histoire comporte des particularités qui lui sont propres. Le problème est de taille mais ne condamne pas à l'immobilisme car, entre la situation actuelle telle que nous l'avons décrite et l'idéal qu'on peut envisager, il y a place pour de nettes améliorations.

VII. LE RATIONALISME ABUSIF

Que la science nous rapproche graduellement de la vérité

Plus on a tendance à se représenter la réalité comme une totalité repliée sur elle-même, ayant son ordre nécessaire, fixé d'avance, prédéterminé, un ordre caché qu'il s'agit seulement de dévoiler, plus on a tendance à considérer la science comme un édifice ayant acquis dans le passé ses fondations ultimes, et auquel le temps qui court permet d'ajouter peu à peu des étages. La science, dans l'histoire, serait ainsi une accumulation de faits bien établis et un cumul incessant de représentations successives de ces faits, les unes, à savoir les plus récentes, étant plus assurées que les autres. La connaissance scientifique équivaudrait donc à un dévoilement, processus lui-même transparent, d'une vérité opaque, chaque épisode marquant le relai d'une opinion d'abord préjugée vers une opinion de mieux en mieux informée. Sous prétexte qu'elle est historiquement ininterrompue depuis Babylone, la conquête du vrai se ferait sans ruptures, sans changements brusques, sans mutations soudaines : cette conquête serait continue parce que cumulative.

Nous qualifions cette position épistémologique de rationalisme abusif. Que l'histoire effective des sciences puisse être vraiment racontée comme l'amélioration graduelle de nos opinions sur le réel, depuis ce que les Grecs appelaient doxa, ou opinion commune le plus souvent sans fondement, jusqu'à ce qu'ils baptisèrent épistémè, ou savoir véritable, on en prend habituellement pour preuve l'amélioration de nos conditions de vie par le biais des retombées technologiques, elles-mêmes fruits de nos sciences appliquées. Les sciences appliquées seraient au niveau pratique la conquête de ce que seraient les sciences fondamentales au niveau théorique : après avoir compris comment, au

fond, les choses se passent réellement, nous aurions le loisir de démontrer cette absolue maîtrise dans le domaine des apparences sensibles et des choses d'utilité courante. Ainsi, la preuve que la biochimie dit vrai, c'est, entre autres, la pharmacie. La preuve que, d'Hippocrate à Hans Selye, la médecine s'est grandement améliorée, c'est que nous vivons plus vieux et mieux maintenant. La preuve que l'atomisme de Bohr est en progrès sur celui d'Épicure, c'est Hiroshima et Nagasaki.

Laissons tomber pour l'heure les problèmes éthiques et sociopolitiques d'une telle position et concentrons-nous plutôt sur son interprétation proprement épistémologique : demandons-nous alors si l'activité scientifique est accumulation continue des faits d'observation et continuation cumulative d'une seule et même grande théorie par l'addition à l'ensemble de départ d'idées nouvelles ayant fait leurs preuves sur le plan pratique.

La cueillette de données n'a, comme telle, aucun sens indépendamment de leur interprétation possible et, nous l'avons déjà souligné, à moins d'avoir au préalable esquissé, tout au moins à titre heuristique, le cadre conceptuel qui permettra l'interprétation, l'empirisme candide de la collecte des faits bruts ne rime à rien. La cueillette de données ne se fait pas seulement en fonction d'un cadre théorique mais dans la perspective avouée d'en tester la solidité et de faire voir sa propre compétence de chercheur à utiliser avec succès ce cadre théorique dans la résolution de problèmes. Ce qui compte avant tout en science, ce sont les idées qu'on a sur les faits dont on dispose, et non pas les données qu'on a sans les concepts qui en rendraient compte.

Or, les systèmes d'idées scientifiques sont contextuellement dépendants et c'est le plus souvent au prix d'un anachronisme et par illusion rétrospective que la science d'autrefois et celle d'aujourd'hui se télescopent. Il y a une différence appréciable entre faire de la science pour démontrer l'existence de Dieu et faire de la science pour maîtriser son environnement. De plus, chaque époque a ses tabous, que l'on pense à Aristote en exil, à Giordano Bruno sur son bûcher, à Galilée à genoux, à Darwin anathémisé, à Freud ignoré, etc. S'il y a une continuation du travail scientifique d'une époque à l'autre cela ne

veut pas dire que la transmission de l'information se fait sans perte et que la démarche est linéaire. Ce qui crée l'illusion (non pas que, quantitativement parlant, nous savons plus de choses mais bien que nous connaissons mieux maintenant ce que d'autres avant nous prétendaient savoir) c'est le processus par lequel, à chaque époque, nous refaisons nos manuels et nous réécrivons l'histoire de la discipline, laissant de côté aussi bien ce qui ne semble être que scories que ce qui ne mène pas droit au but, réinterprétant tout le passé en fonction du présent, départageant de la sorte la "science périmée" de la "science sanctionnée"[17].

La science n'est pas une activité de connaissance qui progresse unidirectionnellement, sans possibles retours en arrière[18]. Elle a plutôt une structure arborescente, et plusieurs branches ne mènent à rien tandis que d'autres sont longtemps fertiles. Mais rien n'assure quiconque que la branche choisie de l'alternative ne s'avérera jamais, tout compte fait, être une impasse. Le cas échéant, des révisions déchirantes peuvent s'imposer, qu'on les fasse soi-même ou que d'autres s'en chargent. Admettons donc qu'il y a rupture du phlogistique de Priestley à l'oxygène de Lavoisier, qu'il y a renversement de perspectives du transformisme de Lamarck à l'évolutionnisme de Darwin, qu'il y a une sorte de saut quantique de $F = MA$ à $e = mc^2$.

Éradication pédagogique

C'est Einstein qui disait que l'esprit, face à l'univers et aux explications qu'il peut en fournir, est dans la situation où l'on voudrait expliquer le fonctionnement d'une montre sans jamais pouvoir l'ouvrir. On peut entendre le tic-tac, voir la trotteuse se déplacer, mais il faut imaginer le mécanisme qui rend compte des observations. De là à savoir si le modèle de mécanisme que l'on propose et celui qui est dans le boîtier sont identiques, nul ne peut le dire. Cela ne signifie pas qu'il n'y ait aucun rapport entre les modèles construits et la réalité, mais détermine plutôt l'une des limites de l'entendement humain. Ainsi le progrès de la science ne consisterait pas à dévoiler la réalité, à s'approcher asymptotiquement de la vérité, mais plutôt à construire des modèles et théories qui forment des explications plus puissantes dans la mesure où elles permettent de meilleures prédictions, mais également et peut-

être surtout parce qu'elles permettent de formuler davantage de questions. Voilà pourquoi Gaston Bachelard pouvait écrire :

> C'est précisément ce sens du problème qui donne la marque du véritable esprit scientifique. Pour un esprit scientifique, toute connaissance est une réponse à une question. S'il n'y a pas eu de question, il ne peut y avoir connaissance scientifique. Rien ne va de soi. Rien n'est donné. Tout est construit.[19]

Pourtant force nous est d'admettre que notre pédagogie reflète bien peu cet état d'esprit garant du progrès scientifique, puisque nos cours et nos programmes sont plus souvent qu'autrement des réponses toutes faites à des questions que les élèves ne se posent même pas. Faire comprendre et faire vivre à l'élève ce processus jamais achevé de l'évolution de la connaissance constitue un des grands défis posé par l'enseignement des sciences.

Activité 7 : Faire évoluer un modèle

Bien que cela soit peu orthodoxe, il peut être intéressant de débuter l'année en construisant le modèle de la théorie cinétique des gaz. Par exemple dans un petit livre intitulé La Physique par la redécouverte dirigée, Trempe et Désautels[20] proposent une bande dessinée de 16 pages qui porte sur ce sujet, et dont la structure est la suivante.

La bande dessinée comprend deux histoires : l'une est constituée d'une énigme policière et l'autre d'une énigme scientifique. Les deux personnages de la bande dessinée tentent successivement et pour chaque histoire de décrire un phénomène, d'en déterminer les causes et d'en fournir une explication globale. À chaque étape de leur démarche et pour les trois niveaux d'explication, ils formulent une première hypothèse qui se révélera fausse, puis une seconde qui s'avérera mieux expliquer le phénomène qu'ils étudient. Par exemple, dans la première partie, l'un des deux personnages, pour résoudre l'énigme posée par les lettres 3D - 4K, suppose qu'il s'agit de 3 diamants de 4 carats, mais cette explication se révélera fausse. Dans la deuxième partie, au moment de fournir une explication du comportement des gaz, ils proposent un

modèle de "particules qui s'étirent" qui permet d'expliquer certaines caractéristiques de ces comportements mais s'avère impuissant à en expliquer certaines autres. Ce n'est que par la suite que la théorie cinétique sera proposée en tant qu'explication de l'ensemble des comportements.

Quoiqu'un peu caricaturale, cette bande dessinée peut être utilisée afin de mettre en relief le caractère conjectural des hypothèses et la nature évolutive des explications. Tout au long de son travail, l'élève doit réaliser des expériences afin de poursuivre sa lecture. Dans la mesure où cet exercice est accompagné d'une interrogation épistémologique, il s'avérera possible de faire ressortir le caractère évolutif des explications et les critères en vertu desquels on porte des jugements sur les divers modèles.

Activité 8 : Prendre conscience du progrès

Il est de mise dans de nombreux cours de chimie et de physique d'étudier l'atome en suivant l'évolution historique des divers modèles explicatifs. Nombreux sont les enseignants qui se sont vu demander par leurs élèves si on allait enfin connaître le "vrai" modèle. Il ne faut alors pas oublier que ces élèves ont 9 ou 10 années d'expérience scolaire au cours desquelles ils ont appris qu'il y avait une vérité unique. De Dalton à Bohr en passant par Rutherford on explique comment la conception de l'atome a évolué. Cette pratique fort intéressante en soi manque toutefois le but dans la mesure où elle ne s'accompagne pas d'une discussion d'ordre épistémologique. Le modèle de Rutherford est-il plus vrai ou moins vrai que celui de Bohr? En vertu de quels critères a-t-on adopté un modèle plutôt que l'autre? Autant de questions susceptibles d'alimenter une discussion au cours de laquelle les élèves peuvent prendre conscience des problèmes que nous avons soulevés.

L'évolution des modèles de la lumière nous apparaît également être un thème intéressant. Les deux sources suivantes sont fort pertinentes par rapport aux objectifs que nous poursuivons. Il y a d'abord le deuxième volume du PSSC qui traite successivement des divers modèles de la lumière, des rayons lumineux aux ondes en passant par les particules. Toutefois, la discussion d'ordre

épistémologique est faible et en ce sens, le travail de Finegold[21] nous paraît mieux fait. Tous deux insistent cependant avec raison sur l'évolution des modèles scientifiques.

VIII. LE RESSOURCEMENT ÉPISTÉMOLOGIQUE DE L'ENSEIGNEMENT DES SCIENCES

Le caractère novateur du projet que nous proposons nous amène spontanément à formuler des interrogations de deux ordres, liées à sa faisabilité et à sa finalité. Est-il vraiment possible que de jeunes adolescents du niveau secondaire puissent réfléchir sur la nature du savoir scientifique et à quelles conditions? Pourquoi est-il nécessaire que les élèves poursuivent une telle réflexion, et en quoi cela change-t-il radicalement l'enseignement des sciences?

S'interroger pour penser

La première question que nous avons posée est associée à la possibilité pour de jeunes adolescents de changer les prémisses épistémologiques qui gouvernent leur vision du monde. Afin de répondre à cette question et formuler les conditions nécessaires à ce changement, nous nous référerons successivement à la psychologie cognitive et à l'histoire des sciences.

Le modèle du fonctionnement cognitif développé par Jean Piaget[22] enseigne que le point de départ de toute démarche de connaissance constitue un déséquilibre cognitif associé à l'interaction entre le sujet connaissant et l'objet de connaissance. Déséquilibre qui naît de la différence entre les attentes ou les croyances du sujet et l'information qu'il reçoit. En ce sens on peut dire que le statut de la connaissance scientifique n'a jamais été une cause de déséquilibre cognitif pour les élèves puisque pour eux il est évident que nous voyons les choses telles qu'elles sont en réalité. Il sera donc nécessaire, du point de vue didactique, de concevoir des situations pédagogiques susceptibles d'induire chez les élèves des déséquilibres cognitifs associés à ce

problème particulier. Mais suffit-il que la question soit posée pour que l'esprit s'engage dans une démarche de connaissance?

Il semblerait qu'il n'en soit pas ainsi si on se réfère à l'histoire des sciences. Celle-ci nous montre, en effet, que les changements paradigmatiques ne s'opèrent pas automatiquement dès qu'il y a présence d'anomalies (déséquilibres cognitifs) qui ne peuvent s'expliquer dans le cadre d'un paradigme donné, et Thomas Kuhn en a fait une brillante démonstration dans son essai sur l'évolution de la science. Il faudra, par exemple, que s'accumulent tout un ensemble d'anomalies pour que la théorie du phlogistique soit abandonnée au profit d'une théorie qui rende mieux compte des faits.

Non seulement la communauté scientifique n'abandonne pas un paradigme aussi facilement, mais l'adoption d'un nouveau paradigme ne constitue pas, à proprement parler, un processus totalement logique car il nécessite l'abandon de croyances métaphysiques et épistémologiques fortement ancrées chez les savants qui oeuvrent dans le cadre du paradigme antérieur. Le cas de Louis Agassiz, tel qu'il est analysé par Pierre Thuillier[23] constitue un exemple frappant de ce phénomène. Agassiz, scientifique chevronné, auteur de travaux scientifiques reconnus, n'a jamais pu abandonner sa vision créationniste des espèces et admettre l'hypothèse évolutionniste de Darwin, et ce, principalement à cause de ses convictions religieuses. D'une façon similaire, le jeune adolescent ne changera pas ses prémisses épistémologiques inconscientes (sa vision du monde) sur la seule foi des dires d'un maître, ou face à quelques contradictions mineures, car ces prémisses, quoique erronées, lui permettent de fonctionner quotidiennement, de se maintenir en équilibre dans un environnement en perpétuel changement. Ainsi, le passage d'une vision sensualiste du monde, associée au réalisme naïf, à une vision plus rationnelle et interactionniste, représente davantage que le simple apprentissage d'un nouveau concept : il s'agit plutôt d'une mutation de la structure conceptuelle de l'individu.

L'entreprise, comme nous pouvons le constater, est difficile et l'élève, pas plus que ses maîtres, ne deviendra spontanément épistémologue. Voilà

pourquoi il nous semble nécessaire de se rappeler constamment les principes didactiques qui suivent :

1) Il ne saurait y avoir changement conceptuel chez l'élève sans qu'il y ait induction d'un déséquilibre cognitif pertinent.
2) Un déséquilibre cognitif ne saurait vraiment être efficace que si l'élève y trouve vraiment une signification, c'est-à-dire si la différence entre ses attentes et l'information obtenue dans l'interaction est associée à des croyances profondes.
3) Un changement profond dans les prémisses épistémologiques, associées à la vision du monde de l'élève, ne peut s'effectuer qu'à long terme.
4) Un changement profond dans les prémisses épistémologiques, associées à la vision du monde de l'élève, ne peut s'effectuer que s'il y a prise de conscience de ces prémisses et réflexion épistémologique subséquente.
5) Un changement profond dans les prémisses épistémologiques, associées à la vision du monde de l'élève, ne peut s'effectuer que si l'élève atteint, éventuellement, le niveau opératoire formel.

Il s'agit là, à n'en pas douter, d'un programme s'étalant sur l'ensemble des années du niveau secondaire. Toutefois sa réalisation a, comme nous avons tenté de le montrer, une importance capitale pour la rénovation de l'enseignement des sciences.

Penser scientifiquement à l'école

Au départ, nous avons choisi de renverser la traditionnelle question de la place de la science à l'école : en effet, nous nous sommes plutôt intéressés à la fonction de l'enseignement des sciences dans la dynamique globale de la science, pour dévoiler un rôle inconsciemment assumé par les professeurs de sciences du niveau secondaire. C'est pourquoi il importe avant toute chose de prendre conscience qu'à ce niveau fondamental, l'enseignement transmet aussi bien une conception de la science qu'un ensemble ordonné de connaissances théoriques. Jamais, à ce qu'il nous semble, cette dimension de la pédagogie des sciences n'a été prise en considération, ni pour être examinée pour elle-même, encore moins pour être critiquée.

L'examen que nous en avons proposé n'a porté que sur cinq des principaux constituants de cette conception véhiculée par l'enseignement des sciences au secondaire. En fait, le mythe du scientisme déborde amplement la description

que nous en avons faite, et en ce sens notre enquête n'est qu'un début. Si nous avons cru bon d'adjoindre à l'examen de ce mythe une esquisse de critique, c'est, bien sûr, parce que nous sommes d'avis qu'une telle conception de la science a quelque chose d'étriqué et d'illusoire et qu'à ce titre, elle est inapte à fournir à la société d'aujourd'hui et de demain les esprits scientifiques les plus lucides. Former les jeunes esprits dans le cadre de la légitimation et de la valorisation scientistes de la science, c'est les empêcher de prendre conscience des limites de validité de l'entreprise scientifique, c'est leur faire croire en vain que la science retranscrit fidèlement les messages que lui dicte la nature et qu'ainsi, progressivement, l'humanité va se doter d'un savoir total rendant possible l'absolue maîtrise de la réalité. De la sorte, ce qui fait la fiabilité authentique de l'acte de science est passé sous silence et le jeune esprit qui est initié à cette activité se trouve obnubilé par une fausse idée de la science. Le mythe du scientisme, parce qu'il est opérant dans l'enseignement des sciences au niveau secondaire, pousse à l'idolâtrie -- or, en un sens, cela est le contraire même de l'esprit scientifique.

Le mythe du scientisme ne saurait être évacué, c'est là notre thèse centrale, que par le recours à la critique épistémologique, et c'est pourquoi nous proposons aux enseignants du secondaire de réorienter radicalement leur pratique pédagogique en fonction de cet objectif nouveau. Car, si la conception de la science transmise à l'école est mythique, il importe de se donner les moyens conceptuels de la démystifier. Loin de proposer l'épistémologie comme une nouvelle conception de la science, nous proposons plutôt de la faire servir à la désaliénation de l'intelligence scientifique. Un enseignement des sciences visant à rendre le jeune esprit conscient des limites de validité que comporte la pratique scientifique pourrait empêcher que s'installe avec le temps, comme c'est justement le cas à l'heure actuelle, une attitude dogmatique, conséquence de la perte de l'esprit critique. La confiance dogmatique en la science mène à l'élitisme, au technocratisme, au comportement social autoritaire et anti-démocratique. Avec un tel visage, la science provoque l'indifférence et elle ne mérite que désaffection.

Nous croyons fermement qu'il en irait tout autrement si la pratique scientifique ne masquait pas son incertitude intrinsèque. L'esprit scientifique n'aura toutes les chances de se développer à l'école que le jour où il sera continuellement autocritique.

NOTES

1. Notre propos est directement inspiré ici des travaux d'Ernst Cassirer, et en particulier de sa Philosophie des formes symboliques, dont le troisième volume est consacré à l'étude de la formation symbolique de la pensée scientifique, Paris, Éd. de Minuit, 3 vol., 1972.

2. Voir Jacques Désautels, École + Science = Échec, Éd. Québec Science, 1980, p. 109.

3. Voir Fritjof Capra, The Tao of Physics, Fontana Collins, 1975, p. 27-28.

4. Voir John R. Hale, L'âge des découvertes, Collection Time Life, 1967.

5. Voir Gaston Bachelard, La formation de l'esprit scientifique, Paris, Librairie philosophique Vrin, 1938, 9e éd., 1978.

6. Pour les lecteurs intéressés à ce sujet, voici une référence utile : Rosalind Driver, Jack Easley, "Pupils and Paradigms : A Review of Literature Related to Concept Development in Adolescent Science Students", Studies in Science Education, nº 5, 1978, p. 61-84.

7. Voir Histoire de la science, sous la direction de Maurice Daumas, Paris, Gallimard, Encyclopédie de la Pléiade, vol. 5, 1957, p. 918.

8. Voir "The Role of Inquiry in Science Education - Analysis and Recommendations", par W. Welch, L. Klopfer, G. Aikenhead, J. Robinson, Science Education, 65(1), 1981, p. 33-50.

9. Nous tenons à souligner que l'idée de cette nouvelle boîte noire a été élaborée à la suite de discussions menées avec le professeur Jean Dionne, du Département de didactique, Faculté des sciences de l'Éducation de l'Université Laval.

10. Voir J. Désautels, op. cit., p. 87.

11. Thomas L. Russell, "What History of Science, How Much, and Why?", Science Education, 65(1), 1981, p. 51-65.

12. Thomas S. Kuhn, The Essential Tension, Chicago, The University of Chicago Press, 1977, p. 110-112.

13. Christian Laville, "Les historiens canadiens", Cahiers de Clio, n° 66, 1981, p. 11.

14. Pierre Thuillier, Darwin & Co., Bruxelles, Éditions Complexe, 1982, p. 15.

15. Harvey Siegel, "On the Distortion of the History of Science", Science Education, 63(1), 1979, pp. 111-118. On consultera également avec profit l'ouvrage de Kuhn, La Révolution copernicienne.

16. Voir C. Laville, op. cit., p. 7.

17. Ces expressions sont de Gaston Bachelard.

18. Le plus célèbre retour en arrière est peut-être celui qui, avec Copernic, permet de renouer avec l'héliocentrisme d'Aristarque de Samos (circa -310 à -230). Voir T.S. Kuhn, La Révolution copernicienne.

19. G. Bachelard, op. cit., p. 14.

20. J. Désautels, P.L. Trempe, La Physique par la redécouverte dirigée, Montréal, Y. Bordas-Dunod, 1972.

21. M. Finegold, From Visual Rays to Particules, Toronto, Institut d'études pédagogiques de l'Ontario, 1976.

22. Jean Piaget, Six études de psychologie, Paris, Éditions Gonthier, 1964.

23. Voir P. Thuillier, op. cit., chapitre 3.

BIBLIOGRAPHIE

Les quelques titres indiqués ci-après ont pour seul objectif d'aider le lecteur du présent document à se retrouver dans la problématique ici présentée. Quelques jalons traçant un chemin possible pour celui ou celle qui décidera de s'aventurer plus loin, voilà de quoi il s'agit.

Bachelard, Gaston (1938) — La formation de l'esprit scientifique : contribution à une psychanalyse de la connaissance objective. Paris, éd. Vrin 9e éd., 1978.

Bachelard, Gaston (1940) — La philosophie du Non. Paris, Presses Universitaires de France, 5e éd., 1970.

Carnap, Rudolph (1966) — An Introduction to the Philosophy of Science. New York, Basic Books Inc. (Paperback Ed., 1974). Traduction française : Les Fondements philosophiques de la physique, Paris, Librairie Armand Colin.

Hempel, Carl G. (1966) — Philosophy of Natural Science. Englewood Cliffs, N.J., Prentice Hall. Traduction française : Éléments d'épistémologie. Paris, Librairie Armand Colin, 1972.

Kuhn, Thomas S. (1957) — The Copernician Revolution. New-York, Vintage Books, 2e éd., 1959. Traduction française : La Révolution copernicienne. Paris, Arthème Fayard, 1973.

Kuhn, Thomas S. (1962) — The Structure of Scientific Revolutions. Chicago, University of Chicago Press, 2e éd., 1970. Traduction française : La Structure des révolutions scientifiques. Paris, Flammarion, 1972.

Piaget, Jean (1964) — Six études de psychologie. Paris, Gonthier.

Thuillier, Pierre (1981) — Darwin & Co. Bruxelles, Éditions Complexe.

Toulmin, Stephen (1961) — Foresight and Understanding. Bloomington, Indiana University Press. Rééd. à New-York, Harper & Row. Traduction française : L'Explication scientifique. Paris, Librairie Armand Colin, 1973.

Watson, James D. (1968) — The Double Helix : A Personal Account of the Discovery of the Structure of DNA. New York, Atheneum. Traduction française : La Double hélice, ou comment fut découverte la structure de l'ADN. Paris, R. Laffont, 1968.

PUBLICATIONS DU COMITÉ DE L'ENSEIGNEMENT DES SCIENCES

Rapports

À l'école des sciences -- La jeunesse canadienne face à son avenir
Rapport 36 (avril 1984)

Étude de documentation

L'enseignement des sciences dans les écoles canadiennes -- Introduction et analyse des programmes d'études
Étude de documentation 52, volume I, par Graham W.F. Orpwood et Jean-Pascal Souque (avril 1984)

L'enseignement des sciences dans les écoles canadiennes -- Données statistiques de base pour l'enseignement des sciences au Canada
Étude de documentation 52, volume II, par Graham W.F. Orpwood et Isme Alam (avril 1984)

L'enseignement des sciences dans les écoles canadiennes -- Études de cas
Étude de documentation 52, volume III, par John Olson et Thomas Russell (avril 1984)

Exposés à débattre

Un contexte canadien pour l'enseignement des sciences
par James E. Page (octobre 1979)

L'enseignement des sciences dans une perspective sociale
par Glen S. Aikenhead (février 1981)

L'enseignement des sciences vu par un ingénieur
par Donald A. George (juin 1981)

Qu'est-ce que la pensée scientifique?
par Hugh Munby (mars 1982)

La Macroscole ou l'enseignement systémique des sciences
par Marcel Risi (octobre 1982)

La culture scientifique -- Vers l'équilibre dans le choix d'objectifs pour l'enseignement des sciences à l'école
par Douglas A. Roberts (mai 1983)

Épistémologie et didactique des sciences
par Robert Nadeau et Jacques Désautels (avril 1984)

Comptes rendus

Les sciences au Québec : Quelle éducation?
(octobre 1981)

Qui fait tourner la roue?
(janvier 1982)

Autres publications

Bulletin concernant l'Étude sur l'enseignement des sciences
(n^{os} 1-5)

Les femmes et l'enseignement des sciences au Canada -- Déclaration
(janvier 1982)